



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

**NÁVRH A REALIZACE ZOBRAZOVACÍHO
REFLEKTOMETRU 2. GENERACE A JEHO
APLIKACE V OPTICKÉ ANALÝZE TENKÝCH
VRSTEV**

DESIGN AND REALIZATION OF THE SECOND GENERATION IMAGING REFLECTOMETER AND
ITS APPLICATION IN OPTICAL ANALYSIS OF THIN FILMS

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jiří Vodák

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. RNDr. Miloslav Ohlídal, CSc.

BRNO 2016

Klíčová slova:

Zobrazovací spektroskopická reflektometrie, optická charakterizace, tenké vrstvy.

Keywords:

Imaging spectroscopic reflectometry, optical characterization, thin films.

VODÁK, J. *Návrh a realizace zobrazovacího reflektometru 2. generace a jeho aplikace v optické analýze tenkých vrstev*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 83 s. Vedoucí dizertační práce prof. RNDr. Miloslav Ohlídál, CSc.

ABSTRAKT

Práce se zabývá technikou zobrazovací spektroskopické reflektometrie vyvíjenou na Ústavu fyzikálního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Jedná se o techniku vhodnou k charakterizaci vzorků neuniformních podél jejich povrchu. Technika je primárně používána k optické charakterizaci tenkých vrstev.

V úvodní části práce jsou popsány základní fyzikální principy, na kterých je technika založena. Dále je popsána metodika získávání měřených dat a základní popis metod zpracování těchto dat. Je rovněž popsán základní koncept zobrazovacího spektroskopického reflektometru včetně rozboru různých variant jednotlivých částí přístroje.

V hlavní části se práce zabývá popisem dvou realizovaných přístrojů včetně popisu některých kroků při vývoji těchto přístrojů. Jsou také prezentovány výsledky měření provedených se zmíněnými přístroji. V závěru práce je pak nastíněn a odůvodněn směr vývoje techniky zobrazovací spektroskopické reflektometrie k zobrazovací spektroskopické elipsometrii.

ABSTRACT

The work deals with a technique of imaging spectroscopic reflectometry developed at The Institute of Physical Engineering, Brno University of Technology. The technique is well suited for characterization of samples non-uniform along their surfaces. The technique is primarily used for optical characterization of thin films.

First part of the work is focused on basic physical principles of the technique and on ways in which measurement data are obtained. It contains a basic description of evaluating methods and a basic concept of an imaging spectroscopic reflectometer with a description of main parts of such a device.

The main part of the work is focused on a description of two devices which were built at The Institute of Physical Engineering together with a description of some of upgrades which were implemented to these devices during their development. A description of measurements done with the two devices is also included. Last part of the work is then focused on further development of the technique. Intention of possible evolution of the technique to imaging spectroscopic ellipsometry is proposed.

Prohlašuji, že jsem předloženou dizertační práci vypracoval samostatně za odborného vedení Prof. RNDr. Miloslava Ohlídala, CSc. Dále prohlašuji, že všechny podklady, ze kterých jsem čerpal jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Ing. Jiří Vodák

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Prof. RNDr. Miloslavu Ohlídaloovi, CSc. za odborné vedení, konzultace, podporu a za rady a náměty. Také bych chtěl poděkovat Mgr. Davidu Nečasovi, Ph.D a Mgr. Danielu Frantovi, Ph.D. za vyhodnocování dat a odtud plynoucí zpětnou vazbu. Další poděkování patří Ing. Vladimíru Čudkovi, Ph.D, autorovi prvotní sestavy, za užitečné rady a pomoc. A v neposlední řadě bych chtěl poděkovat mým rodičům a mé manželce za neutuchající podporu v mé práci.

Ing. Jiří Vodák

OBSAH

| | |
|---|----|
| 1.ÚVOD..... | 4 |
| 2.ZOBRAZOVACÍ SPEKTROSKOPICKÁ REFLEKTOMETRIE..... | 6 |
| 2.1.Odrazivost rozhraní..... | 6 |
| 2.2.Fresnelovy koeficienty..... | 7 |
| 2.3.Odrazivost vrstvy..... | 8 |
| 3.ZOBRAZOVACÍ SPEKTROSKOPICKÝ REFLEKTOMETR..... | 10 |
| 3.1.Zdroj světla..... | 10 |
| 3.1.1.Laditelné lasery..... | 10 |
| 3.1.2.Výbojky..... | 11 |
| 3.1.3.Deuteriová výbojka..... | 12 |
| 3.1.4.Kombinované zdroje..... | 12 |
| 3.1.5.LED zdroje..... | 12 |
| 3.2.Monochromátor..... | 12 |
| 3.2.1.Monochromátor s disperzním hranolem..... | 13 |
| 3.2.2.Monochromátor s difrakční mřížkou..... | 13 |
| 3.3.Kolimátor..... | 14 |
| 3.3.1.Sférické zrcadlo..... | 15 |
| 3.3.2.Mimoosové parabolické zrcadlo..... | 15 |
| 3.4.Dělič světelného svazku..... | 16 |
| 3.4.1.Dělicí deska..... | 17 |
| 3.4.2.Membránový dělič světelného svazku..... | 19 |
| 3.4.3.Dělicí krychle..... | 19 |
| 3.4.4. Dělič „Polka dot“..... | 22 |
| 3.5.Zobrazení..... | 22 |
| 3.6.Měřicí kamera..... | 23 |
| 3.7.Propojení jednotlivých částí přístroje..... | 23 |
| 3.7.1.Ustavení přístrojů..... | 24 |
| 3.7.2.Mechanické spojení..... | 24 |
| 3.7.3.Kabel optických vláken..... | 24 |
| 3.8.Záznam a zpracování signálu..... | 24 |
| 3.8.1.Volba expoziční doby kamery..... | 25 |
| 3.8.2.Měřený signál..... | 26 |
| 4.DALŠÍ ZPRACOVÁNÍ DAT ZÍSKANÝCH TECHNIKOU ZOBRAZOVACÍ SPEKTROSKOPICKÉ REFLEKTOMETRIE..... | 29 |
| 4.1.„Single–pixel“ metoda zobrazovací spektroskopické reflektometrie jako metoda pomocná..... | 30 |
| 4.2.„Single–pixel“ metoda zobrazovací spektroskopické reflektometrie jako metoda samostatná..... | 30 |

| | |
|---|-----------|
| 4.3.„Multi–pixel“ metoda zobrazovací spektroskopické reflektometrie jako metoda samostatná..... | 30 |
| 4.4.„Multi–pixel“ metoda zobrazovací spektroskopické reflektometrie v kombinaci s konvenčními metodami..... | 31 |
| 4.5.Sekvence metod zobrazovací spektroskopické reflektometrie..... | 31 |
| 4.6.Další aplikace..... | 32 |
| 5.VÝVOJ ZOBRAZOVACÍHO SPEKTROSKOPICKÉHO REFLEKTOMETRU NA ÚSTAVU FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ..... | 33 |
| 6.ZOBRAZOVACÍ SPEKTROSKOPICKÝ REFLEKTOMETR S ROZŠÍŘENÝM SPEKTRÁLNÍM ROZSAHEM..... | 34 |
| 6.1.Zdroj širokospektrálního světla..... | 34 |
| 6.2.Monochromátor Jobin Yvon Triax 320..... | 36 |
| 6.3. Kabel optických vláken..... | 37 |
| 6.4.Kolimátor..... | 38 |
| 6.5.Dělič..... | 38 |
| 6.6.Nastavení vzorku..... | 39 |
| 6.7.Měřicí kamera..... | 40 |
| 6.7.1.Detekce světla rozptýleného difrakční mřížkou..... | 42 |
| 6.8.Referenční kanál..... | 44 |
| 6.8.1.Referenční kanál s fotodiodou..... | 44 |
| 6.8.2.Referenční kanál s využitím sekundárního referenčního vzorku..... | 45 |
| 6.9.Řidicí software..... | 46 |
| 7.ZOBRAZOVACÍ SPEKTROSKOPICKÝ REFLEKTOMETR S VYŠŠÍM LATERÁLNÍM ROZLIŠENÍM..... | 48 |
| 7.1.Zdroj monochromatického světla..... | 48 |
| 7.2.Kolimátor..... | 49 |
| 7.3.Membránový dělič..... | 49 |
| 7.4.Kamera G1–1400..... | 51 |
| 7.4.1.ASCOM standard..... | 51 |
| 7.5.Vodorovný stůl pro vzorky..... | 52 |
| 7.6.Návrh zobrazení..... | 52 |
| 7.7.Návrh a konstrukce..... | 55 |
| 8. MĚŘENÍ PROVEDENÁ POMOCÍ ZOBRAZOVACÍCH SPEKTROSKOPICKÝCH REFLEKTOMETRŮ..... | 58 |
| 8.1.Měření lokálních optických parametrů podél plochy vzorků tenkých vrstev..... | 58 |
| 8.1.1.Vrstvy ZnSe na GaAs..... | 58 |
| 8.1.2.Vrstvy $\text{SiO}_x\text{C}_y\text{H}_z$ a CN_xH | 58 |
| 8.2.Vzorky s vysokými gradienty tloušťky..... | 59 |
| 8.3.Měření absolutní odrazivosti vzorku..... | 60 |

| | |
|--|----|
| 8.4.Měření úrovně redukce kovů z organických sloučenin..... | 60 |
| 9.DALŠÍ VÝVOJ ZOBRAZOVACÍCH TECHNIK..... | 63 |
| 9.1.Zobrazovací spektroskopická reflektometrie s proměnným úhlem dopadu..... | 63 |
| 9.2.Zobrazovací spektroskopická elipsometrie s proměnným úhlem dopadu..... | 64 |
| 9.3.Prvotní návrh zobrazovacího spektroskopického elipsometru s proměnným úhlem dopadu..... | 64 |
| 9.3.1.Goniometr..... | 65 |
| 9.3.2.Zdroj světla..... | 65 |
| 9.3.3.Monochromátor..... | 65 |
| 9.3.4.Zobrazovací soustava..... | 65 |
| 9.3.5.Polarizační prvky..... | 66 |
| 9.3.6.Konstrukční návrh zobrazovacího spektroskopického elipsometru s proměnným úhlem dopadu..... | 66 |
| 10.ZÁVĚR..... | 68 |
| 11.SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK..... | 69 |
| 12.POUŽITÁ LITERATURA..... | 72 |

1. ÚVOD

Optické tenké vrstvy mají v dnešní době široké uplatnění. Objevují se nové aplikace a nové tenké vrstvy. S tím je spojen rozvoj nových technologií přípravy vrstev. Vývoj těchto technologií a vrstev vyžaduje rozvoj technik měření vlastností nových vrstev. Některé techniky měření optických vlastností tenkých vrstev již jsou velmi rozvinuté – např. spektroskopická elipsometrie s proměnným úhlem dopadu (VASE, z anglického variable angle of incidence spectroscopic ellipsometry), měření spektrální odrazivosti vzorků (SR, spektroskopická reflektometrie). Společným jmenovatelem těchto technik je však malá velikost zkoumané oblasti vzorku s jistou výjimkou elipsometrie, kde u velkých úhlů dopadu světelná stopa může pokrýt větší plochu vzorku. Nejedná se zde o výhodu, ale spíše naopak. Avšak tato zkoumaná oblast na neuniformním vzorku může zahrnovat části povrchu s různými vlastnostmi. V takovém případě neuniformní vzorek znamená nesprávnost určených hodnot jeho parametrů, protože naměřené hodnoty jsou průměrovány přes celou tuto oblast. Ke správnému zjištění hodnot parametrů neuniformních vzorků je třeba tuto neuniformitu vzít do úvahy [1]. K tomu potřebné laterální rozlišení použité techniky může být dosaženo např. skenováním po povrchu vzorku [2]. Jinou možností je naopak skenovat detektorem nad vzorkem, někdy také v kombinaci se záznamem studované oblasti vzorku získaným CCD kamerou [3], [4]. Pro velké zkoumané plochy vzorku znamená skenování velkou časovou náročnost. Minimalizace oblasti vzorku, která je při skenování snímána detektorem v jednom kroku (pro navýšení laterálního rozlišení), je také náročný úkol.

Zobrazovací spektroskopická reflektometrie (ISR, z anglického imaging spectroscopic reflectometry) představuje jiný přístup k zisku dostatečného laterálního rozlišení, a to za pomoci zobrazení povrchu vzorku na čip kamery. Laterálním rozlišením ISR rozumíme rozlišení v obrazu povrchu vzorku, které následně určuje rozlišení detailů na povrchu vzorku.

V nedávné době se objevilo toto řešení pro mikroskopické aplikace s využitím mikroskopového objektivu k zobrazení povrchu vzorku na čip CCD kamery a proměnného filtru k vytvoření měřicího monochromatického světelného svazku ze zdroje bílého světla [5]. Technika v této podobě je určena ke kontrole LCD panelů užívaných v oblasti mikro–opto–elektroniky.

Na Ústavu fyzikálního inženýrství (ÚFI) Vysokého učení technického v Brně byla již dříve [6] v Laboratoři koherenční optiky vyvinuta technika ISR, která využívá k zobrazení povrchu studovaného vzorku na čip CCD kamery sférického zrcadla. Technika je vhodná k optické charakterizaci neuniformních vzorků větších rozměrů (cca $20 \times 20 \text{ mm}^2$), tj. primárně k určování lokálních optických parametrů (tj. lokální tloušťka, lokální index lomu a lokální extinkční koeficient) těchto vzorků.

Zobrazovací spektroskopická reflektometrie v obdobné konfiguraci s použitím zobrazovacího zrcadla byla také nezávisle použita k in-situ charakterizaci růstu vrstev [7] na Odboru fyziky pevných látek a povrchů Ústavu fyzikálního inženýrství.

Na základě zkušeností s požadavky průmyslové praxe lze konstatovat, že vývoj technologií přípravy tenkých vrstev vyžaduje možnost kontroly větší plochy vzorků, buď z důvodu ověření uniformity těchto vzorků v jejich optických vlastnostech, nebo naopak možnost charakterizace neuniformních vrstev (i cíleně neuniformních). Technika ISR a zobrazovací spektroskopické reflektometry (ISRM z anglického imaging spectroscopic reflectometer) představované v této práci jsou velmi vhodnými k měření a kontrole optických vlastností tenkých vrstev, zejména vrstev neuniformních v těchto vlastnostech.

2. ZOBRAZOVACÍ SPEKTROSKOPICKÁ REFLEKTOMETRIE

Zobrazovací spektroskopická reflektometrie je technika založená na měření interakce elektromagnetického záření se studovaným vzorkem. Jedná se o optickou metodu, protože obor elektromagnetického záření bývá nejčastěji v oboru viditelného světla, nebo blízkých vlnových délek. Pro zjednodušení bude v této práci používán termín „světlo“ a „světelný svazek“ pro obor elektromagnetického záření v rozsahu přibližně 250 nm až 1100 nm, tj. obor viditelného světla rozšířeného o část blízkého UV a část blízkého IR spektra elektromagnetického záření – typický rozsah měření ISR. Základní úlohou ISR je měření lokální spektrální odrazivosti studovaného vzorku v uvedeném spektrálním rozsahu.

Elektromagnetické záření se skládá ze dvou vzájemně provázaných vln – z vlny elektrické a magnetické. Protože detektory reagují na elektrickou složku vlnění, používá se k popisu elektrická část vlnění.

Nejjednodušší elektromagnetická vlna je vlna rovinná monochromatická, lze ji popsat následovně:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 e^{-i(\omega t - \vec{K} \cdot \vec{r})}, \quad (2.1)$$

Kde \vec{E} je vektor intenzity elektrického pole světelné vlny, \vec{E}_0 vektor amplitudy světelné vlny, ω je úhlová frekvence vlny, t je čas, \vec{K} je vlnový vektor vlny a vektor \vec{r} popisuje polohu místa, kde je vlna sledována.

2.1. ODRAZIVOST ROZHRAŇÍ

Odrazivost rozhraní dvou prostředí je definována jako poměr intenzity elektromagnetické vlny po odrazu od rozhraní a intenzity vlny před odrazem od rozhraní:

$$R = \frac{I_r}{I_i}, \quad (2.1.1)$$

kde I_r označuje intenzitu odražené vlny a I_i intenzitu vlny dopadající.

Intenzita světelné vlny je úměrná k druhé mocnině amplitudy elektrické složky vlnění, tj.

$$I \propto E_0^2. \quad (2.1.2)$$

Odrazivost rozhraní je veličina, která je měřena při reflektometrických měřeních. V některých případech se měří odrazivost relativní. V tom případě se jedná o poměr odrazivosti studovaného vzorku a vzorku referenčního. Referenční vzorek je volen tak, že je jeho odrazivost známá, dobře reprodukovatelná – např. monokrystalický křemík, případně další monokrystalické materiály.

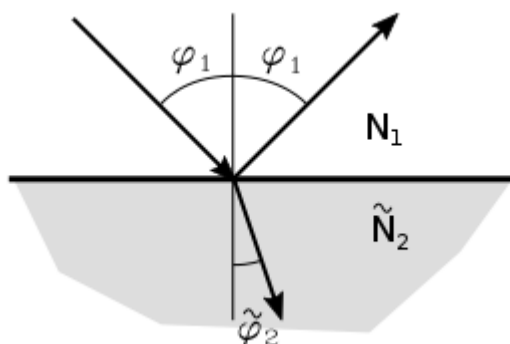
Optické vlastnosti materiálu obecně popisuje komplexní index lomu \tilde{N} . Ten se skládá z reálné složky (index lomu) a imaginární složky (extinkční koeficient). Index lomu n popisuje poměr rychlosti postupu světelné vlny ve vakuu a v daném materiálu ($n = c/v$). V naprosté

většině případů (vyjma např. metamateriálů) proto platí $n > 1$. Extinkční koeficient k popisuje, jak rychle (vzhledem k uražené vzdálenosti světla v materiálu) klesá amplituda vlny v daném prostředí.

Dopadá-li elektromagnetická vlna na rozhraní dvou prostředí (viz obrázek 2.1.1), dochází k rozdělení vlny na dvě – na vlnu odraženou a na vlnu prošlou rozhraním. V dalším budeme uvažovat v optické praxi nejčastější případ, kdy elektromagnetická vlna přichází z neabsorbujícího prostředí do obecně absorbujícího prostředí. Budeme rovněž předpokládat, že rozhraním neteče elektrický proud. Vztah mezi úhly dopadu a odrazu je obecně známý – úhly jsou stejné, vztah mezi úhlem dopadu a úhlem, pod kterým vlna rozhraním prošla vstupuje do druhého prostředí (úhel lomu), je komplikovanější – řídí se Snellovým zákonem:

$$N_1 \sin \phi_1 = \tilde{N}_2 \sin \tilde{\phi}_2, \quad (2.1.3)$$

kde úhel ϕ_1 je úhel dopadu a $\tilde{\phi}_2$ je komplexní úhel po průchodu světla rozhraním. Indexy v předchozím vztahu popisují pořadí jednotlivých prostředí (viz obrázek 2.1.1). Jak bylo výše uvedeno, odrazivost ideálního rozhraní je poměr mezi intenzitami dopadající a odražené světelné vlny, tedy poměr mezi druhými mocninami amplitud elektrické složky těchto vln. Poměr zmíněných amplitud pro jedno ideální rozhraní popisují Fresnelovy



Obr. 2.1.1: Lom světla na rozhraní dvou materiálů.

koeficienty.

2.2. FRESNELOVY KOEFICIENTY

Fresnelovy koeficienty pro odraz vlny jsou pro rozhraní dvou izotropních, homogeních, nemagnetických a neabsorbujících prostředí, na něž dopadá rovinná monochromatická elektromagnetická vlna (tj. vlna popsaná vztahem (2.1)), definovány následovně:

$$r_p = \frac{E_{p,r}}{E_{p,i}}, r_s = \frac{E_{s,r}}{E_{s,i}}, \quad (2.2.1)$$

kde indexy p a s označují po řadě složku rovnoběžnou s rovinou dopadu a složku kolmou k rovině dopadu. Indexy r a i značí po řadě odraženou a dopadající vlnu.

Fresnelovy koeficienty pro průchod vlny zmíněným rozhraním jsou Fresnelovy koeficienty definovány takto:

$$t_p = \frac{E_{p,t}}{E_{p,i}}, t_s = \frac{E_{s,t}}{E_{s,i}}, \quad (2.2.2)$$

kde index t značí prošlou vlnu.

Elektromagnetická vlna se řídí Maxwellovými rovnicemi. Použitím okrajových podmínek pro rozhraní a ze vztahu mezi elektrickou a magnetickou vlnou lze Fresnelovy koeficienty vyjádřit v závislosti na komplexních indexech lomu prostředí a úhlech dopadu a lomu [8] ve tvaru Fresnelových rovnic:

$$\tilde{r}_p = \frac{\tilde{N}_2 \cos \phi_1 - \tilde{N}_1 \cos \phi_2}{\tilde{N}_2 \cos \phi_1 + \tilde{N}_1 \cos \phi_2}, \quad (2.2.3)$$

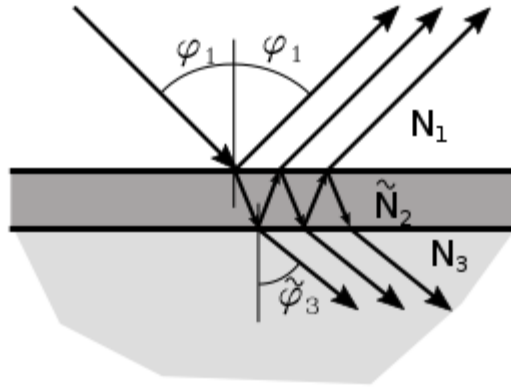
$$\tilde{t}_p = \frac{2 \tilde{N}_1 \cos \phi_1}{\tilde{N}_2 \cos \phi_1 + \tilde{N}_1 \cos \phi_2}, \quad (2.2.4)$$

$$\tilde{r}_s = \frac{\tilde{N}_2 \cos \phi_1 - \tilde{N}_1 \cos \phi_2}{\tilde{N}_2 \cos \phi_2 + \tilde{N}_1 \cos \phi_1}, \quad (2.2.5)$$

$$\tilde{t}_s = \frac{2 \tilde{N}_1 \cos \phi_1}{\tilde{N}_2 \cos \phi_2 + \tilde{N}_1 \cos \phi_1}, \quad (2.2.6)$$

2.3. ODRAZIVOST VRSTVY

Výše uvedené vztahy platí pro jedno rozhraní. Pokud je rozhraní více, dojde k tomu, že vlna lomená na prvním rozhraní projde k rozhraní druhému, kde opět odrazí a láme (viz obrázek 2.3.1). Část vlny, která se od druhého rozhraní odrazí, postupuje zpět k prvnímu rozhraní, kde opět nastává její odraz a lom. Tento jev se děje v případě ideálně neabsorbujících prostředí v podstatě do nekonečna. Použitím Fresnelových koeficientů je možné jev postupně popisovat. Pro zjednodušení předpokládejme, že amplituda vlny dopadající na vrstvu je rovna 1. Amplituda vlny po odrazu bude tedy přímo rovna Fresnelovu koeficientu pro odraz $\tilde{r}_{p,12}$ (index 12 označuje rozhraní mezi prostředím 1 a 2 v tomto pořadí). Amplituda vlny po vstupu z prostředí 1 do prostředí 2 bude $\tilde{t}_{p,12}$ a po odrazu na druhém rozhraní bude její amplituda rovna součinu $\tilde{t}_{p,12} \tilde{r}_{p,23}$ (viz obrázek 2.3.1). Část, která projde prvním rozhraním do prvního prostředí, bude mít amplitudu $\tilde{t}_{p,12} \tilde{r}_{p,23} \tilde{t}_{p,21}$. Část s amplitudou $\tilde{t}_{p,12} \tilde{r}_{p,23} \tilde{r}_{p,21}$ se od tohoto rozhraní odrazí. Takto lze popisovat mnohonásobné odrazy vlny ve vrstvě. Všechny dílčí vlny lze sečíst, je však potřeba počítat také s fázovým posunutím vln vzniklým při jejich průchodu vrstvou.



Obr. 2.3.1: Mnohonásobné odrazy ve vrstvě. Neoznačený úhel lomu ve vrstvě \tilde{N}_2 je úhel $\tilde{\phi}_2$

Vlna vzniklá ze všech dílčích vln je popsána jako jejich nekonečný součet. Jedná se tedy o nekonečnou geometrickou řadu a její součet je možné analyticky určit [9]. Odtud vyplynou vztahy pro interakci světla s tenkou vrstvou. Vztahy mají stejný tvar pro obě polarizace s i p :

$$\tilde{r}_p^v = \frac{\tilde{r}_{p,12} + \tilde{r}_{p,23} e^{-i2\beta}}{1 + \tilde{r}_{p,12} \tilde{r}_{p,23} e^{-i2\beta}}, \quad \tilde{r}_s^v = \frac{\tilde{r}_{s,12} + \tilde{r}_{s,23} e^{-i2\beta}}{1 + \tilde{r}_{s,12} \tilde{r}_{s,23} e^{-i2\beta}}, \quad (2.3.1)$$

$$\tilde{t}_p^v = \frac{\tilde{t}_{p,12} \tilde{t}_{p,23} e^{-i2\beta}}{1 + \tilde{r}_{p,12} \tilde{r}_{p,23} e^{-i2\beta}}, \quad \tilde{t}_s^v = \frac{\tilde{t}_{s,12} \tilde{t}_{s,23} e^{-i2\beta}}{1 + \tilde{r}_{s,12} \tilde{r}_{s,23} e^{-i2\beta}}, \quad (2.3.2)$$

kde indexem v značíme výsledný Fresnelův koeficient pro vrstvu, β je změna fáze vlny při jednom průchodu tenkou vrstvou.

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \tilde{N}_2 d \cos \tilde{\phi}_2, \quad (2.3.3)$$

kde λ je vlnová délka vlny a d je tloušťka vrstvy.

Odrazivost vrstvy na podložce je dána následujícími vztahy:

$$R_p = |\tilde{r}_p^v|^2, \quad R_s = |\tilde{r}_s^v|^2. \quad (2.3.4)$$

3. ZOBRAZOVACÍ SPEKTROSKOPICKÝ REFLEKTOMETR

Klíčovým rysem techniky ISR je zobrazování studovaného vzorku na detektor. Technika ISR vyvíjená na Ústavu fyzikálního inženýrství předpokládá při vyhodnocení měření s jedním společným úhlem dopadu světelného svazku na všechna místa vzorku. Pro všechny oblasti povrchu vzorku zobrazované na jednotlivé pixely detektoru tedy platí stejné zákonitosti jako pro zkoumanou plošku při konvenční (nezobrazovací) SR. Tomuto základnímu požadavku odpovídají všechna konstrukční řešení ISRM, a to jak v případě jeho první vývojové verze, tak v případě posledního již plně funkčního zařízení.

3.1. ZDROJ SVĚTLA

Výběr zdroje světla pro ISRM se odvíjí od požadovaného spektrálního rozsahu, v němž bude probíhat měření. Ve srovnání s konvenční technikou SR musí být ale světelný zdroj pro ISRM výrazně výkonnější. Důvodem pro to je skutečnost, že svazek není fokusován na malou plošku, ani z něj není vytvářen úzký rovnoběžný svazek (v řádu mm), ale světlo je formováno do širokého kolimovaného světelného svazku, jehož průřez musí minimálně odpovídat plánované studované ploše vzorku. Průměr svazku je pak roven několika centimetrům v nejběžnějších případech. V případě vzorku o rozměrech přibližně $2 \times 2 \text{ cm}^2$ musí mít svazek minimální průměr 3 cm. Intenzita v jednotlivých bodech na povrchu vzorku proto významně klesá. Aby bylo dosaženo co největšího odstupu signál/šum, musí být světelný výkon použitého zdroje dostatečně vysoký.

V principu může být zdrojem světla jakýkoliv konvenční světelný zdroj, musí ale splňovat výše uvedené podmínky.

3.1.1. Laditelné lasery

Laditelné lasery mají velkou výhodu v poskytovaném světelném výkonu. Z laserového svazku se navíc velmi snadno vytváří širší kolimovaný svazek. Další výhodou je také velký stupeň monochromatickosti světelného svazku a tudíž není potřeba použít v sestavě ISRM monochromátor. Naladěním laseru je totiž možné volit jednotlivé vlnové délky světla. Nevýhodou laditelného laseru je omezený spektrální rozsah. V závislosti na konstrukci vyzařují laditelné lasery buď na několika vybraných vlnových délkách, nebo je možné je ladit v relativně malém rozpětí okolo jedné vlnové délky. Druhý typ laserů se hodí pro ISR více, použití prvního typu je však také možné (laser tohoto typu byl použit v úplně prvních verzích ISRM na ÚFI).

Komerčně dostupné kontinuálně laditelné lasery s největšími spektrálními rozsahy ve viditelné oblasti spektra nabízejí možnost ladění v rozpětí několika desítek nanometrů. Specifické lasery s rozsahem několika stovek nanometrů existují pouze v blízké a vzdálené infračervené oblasti. Spektrální rozsah tedy není obecně příliš vysoký.

Vysoká koherence laserového světla může mít za následek vzniku koherenční zrnitosti, která narušuje uniformitu intenzity v průřezu osvětlovacího světelného svazku. Proto je nutné tento jev eliminovat (to je možné udělat více způsoby).

Laditelné lasery se tedy pro použití v ISR nehodí.

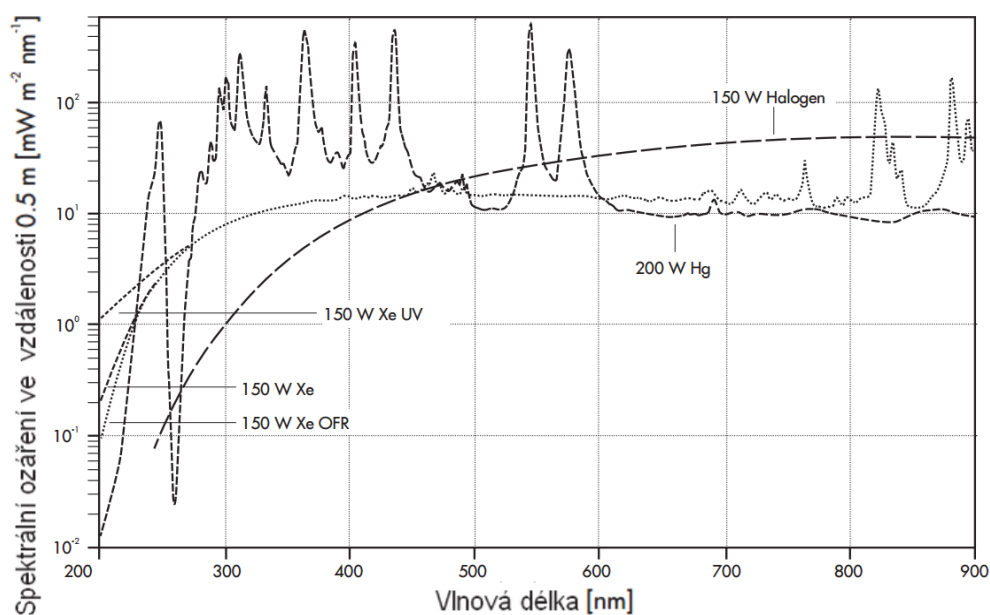
3.1.2. Výbojky

Jako nejvýhodnější zdroj světla pro ISRM se ukazují být výbojky. Výbojky totiž poskytují jak velký zářivý výkon, tak jeho relativně rovnoměrné rozdělení v širokém spektrálním rozsahu, a to v závislosti na typu výbojky. Vhodnou volbou výbojky je možné splnit požadavky kladené na zdroj světla ISRM.

Nejrozšířenějším typem výbojky jsou výbojky rtuťové. Díky jejich širokému spektrálnímu rozsahu se jedná o relativně výhodné zdroje světla pro spektroskopii, nevýhodou ale je, že jejich zářivý výkon není rozdělen v celém spektrálním rozsahu rovnoměrně (rtuťové výbojky silně vyzařují na specifických spektrálních čarách).

Lepší volbou jsou xenonové výbojky, protože mají mnohem rovnoměrnější spektrální rozložení zářivého výkonu. Xenonové výbojky poskytují také záření v blízké UV oblasti a jejich spektrální rozsah zasahuje relativně daleko do infračervené oblasti. Pro UV–VIS–NIR aplikace (spektrální rozsah od blízké ultrafialové do blízké infračervené) jsou xenonové výbojky ideální volbou.

Pro aplikace ve viditelném a infračerveném spektru jsou rovněž vhodné halogenové zdroje, protože při stejném příkonu poskytují ve srovnání s xenonovými výbojkami více zářivého výkonu ve viditelné a infračervené oblasti, přičemž téměř nevyzařují v UV oblasti. To může být pro některé aplikace přínosné.



Obr. 3.1.1: Spektrální závislosti ozáření detektoru ve vzdálenosti 0,5 m pro různé výbojky nabízené firmou LOT–QuantumDesign

Na obrázku 3.1.1 jsou znázorněny spektrální závislosti ozáření detektoru ve vzdálenosti 0,5 m pro několik typů výbojek obdobného výkonu. Za povšimnutí také stojí, že 150 W Xe lampa dodává stejný světelný výkon jako 200 W Hg lampa. 150 W XeUV lampa se liší pouze materiálem baňky výbojky, který neabsorbuje UV záření. V uvedených závislostech je vidět rozdíl pouze pod hranicí 275 nm.

3.1.3. Deuteriová výbojka

Dalším typem výbojky je deuteriová výbojka, která má specifické využití, protože její spektrální rozsah je omezen pouze na UV oblast, a to přibližně v rozsahu od 160 nm do 375 nm. Využití této výbojky by bylo vhodné pouze pro ISRM určený k funkci v UV oblasti spektra. V této oblasti je však limitním faktorem detektor vhodný pro účely ISR. Spektrální citlivost kamer s CCD čipy v UV oblasti spektra totiž klesá k nule pro vlnovou délku 200 nm a níže. V oblasti od 200 nm výše vyzařují specifické xenonové výbojky na obdobné úrovni zářivého výkonu jako deuteriové výbojky. Obecně je proto výhodnější použít Xe výbojku, pokud by nebyl daný ISRM určen vysloveně pro specifická měření výhradně v UV spektrální oblasti.

3.1.4. Kombinované zdroje

Někteří výrobci nabízejí zdroje kombinované. Jedná se většinou o kombinaci výbojek, nejčastěji je kombinována rtuťová výbojka s deuteriovou výbojkou. Výhodou takto navržených světelných zdrojů je větší zářivý výkon v UV části spektra. Posílení tohoto výkonu v UV oblasti spektra je vhodné obzvláště z důvodu horší kvantové účinnosti kamer a nižší propustnosti optických materiálů v této oblasti.

3.1.5. LED zdroje

V dnešní době se začínají na trhu objevovat velice výkonné LED diody a také zdroje určené pro spektroskopii konstruované z LED diod. Technologie výroby bílé svítících LED diod postupuje rychle kupředu a pro měření ve viditelné části spektra, případně blízké IR, začínají představovat zajímavou možnost. Vykazují totiž dlouhou životnost, absenci náběhové doby, jsou malé a robustní. V budoucnosti se dá očekávat, že LED zdroje nahradí část laboratorních zdrojů světla.

3.2. MONOCHROMÁTOR

U konvenční SR se používá k osvětlení vzorku bílého světla a k rozdělení na jednotlivé vlnové délky se většinou provádí až ve spektrometru, ve kterém se provádí rozklad bílého světla na jednotlivé vlnové délky pomocí difrakční mřížky, nebo hranolu (případně jejich kombinace) na lineární čip CCD (kameru). Každý pixel detektoru měří intenzitu světelného svazku v jiné vlnové délce spektra difrakční mřížky. Všechny pixely detektoru však měří intenzitu světelného svazku odraženého od stejné studované oblasti povrchu vzorku.

Tento přístup, urychlující měření, v technice ISR není možný. U ISRM snímá čip CCD kamery celý obraz studovaného vzorku. Každý pixel kamery snímá intenzitu světelného svazku odraženého odpovídající (mu přiřazenou procesem zobrazení) oblastí povrchu vzorku. Rozklad na jednotlivé vlnové délky musí být proveden monochromátorem.

Monochromátor je v ISRM zařazen hned za zdrojem světla a je určen k výběru jeho jednotlivých vlnových délek. Stejně jako světelný zdroj i pro monochromátor je důležitá volba spektrálního rozsahu, v němž bude celý ISRM pracovat.

3.2.1. Monochromátor s disperzním hranolem

Základním typem monochromátoru je monochromátor využívající disperzní hranol. Je obecně známo, že světlo procházející hranolem se rozkládá do různých směrů v závislosti na vlnové délce světla. To je dáno tvarem hranolu a hlavně závislostí indexu lomu materiálu hranolu na vlnové délce světla. Tvar hranolu umocňuje efekt daný materiálem, kdy je tvar hranolu navržen tak, aby lom na druhém rozhraní hranolu ještě více podpořil separaci vlnových délek.

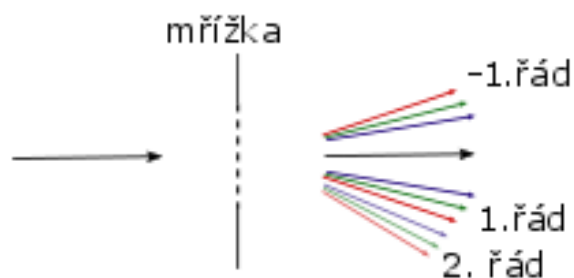
Omezení v použití hranolu je dáno primárně materiálem hranolu, který má obecně omezený spektrální rozsah propustnosti.



Obr. 3.2.1: Rozklad bílého světelného svazku použitím hranolu.

3.2.2. Monochromátor s difrakční mřížkou

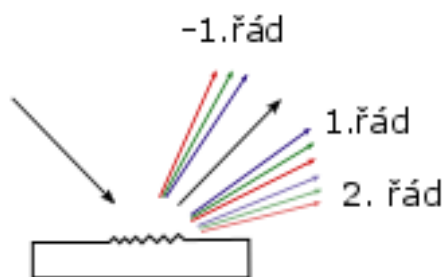
Širší použití ve srovnání s monochromátory s disperzním hranolem mají monochromátory s difrakční mřížkou. Obecně totiž poskytují největší rozsah možných použitelných vlnových délek. Difrakční mřížka rozkládá světelný svazek do různých směrů podle vlnové délky světla na základě jevu difrakce. Mřížka může být konstruována na odraz nebo na průchod. Difraktované světlo různé vlnové délky se bude šířit do různých vybraných směrů. Natáčením difrakční mřížky vůči výstupní štěrbině monochromátoru je možné vybírat požadované vlnové délky. Nevýhodou difrakční mřížky je to, že světlo jedné vlnové délky se rozptýlí do několika směrů, přičemž může docházet k překrývání různých řádů difrakce (viz obrázky 3.2.2 a 3.2.3). K eliminaci tohoto jevu musí být monochromátor doplněn vhodnými spektrálními filtry.



Obr. 3.2.2: Rozklad světelného svazku použitím difrakční mřížky.

Vhodnou volbou difrakční mřížky (případně hranolu), ohniskové vzdálenosti monochromátoru a šířky jeho výstupní štěrbiny je možné volit spektrální šíři kvazi-monochromatického světla. Při vyhodnocování naměřených spektrálních závislostí odrazivosti je potřeba znát spektrální šířku použitého světla. Menší spektrální šířka však obecně znamená nižší intenzitu světla. Důležitý je proto celkový kompromis mezi úrovní monochromatickosti světelného svazku a jeho celkovou intenzitou. Intenzita světelného svazku ovlivňuje potřebnou délku expozice kamery a tedy také poměr signál/šum naměřeného signálu.

3.3. KOLIMÁTOR



Obr. 3.2.3: Rozklad světelného svazku pomocí reflexní difrakční mřížky. Demonstrace překryvu různých difrakčních řádů světla různých vlnových délek.

Úlohou kolimátoru je vytvoření širokého rovnoběžného světelného svazku. V případě použití laditelného laseru jako zdroje světla se kolimátor nachází hned za laserem, v případě polychromatických světelných zdrojů je umístěn až za monochromátorem.

Konstrukce kolimátoru se odvíjí od požadovaných parametrů světelného svazku – v první řadě jeho průřezu. Vzhledem k velké šíři používaných vlnových délek v ISR lze říct, že kolimátor musí být konstruován pomocí zrcadel (vyjma specializovaných ISRM určených pro užší spektra vlnových délek). Konstrukce kolimátoru se může lišit podle tvaru výstupního světelného svazku z monochromátoru a podle navrženého světelného propojení monochromátoru a skříně přístroje ISRM. Obecně lze předpokládat, že kolimátor bude použit pro rozbíhavý svazek vystupující z malé apertury.

3.3.1. Sfěrické zrcadlo

Základním typem zrcadlového kolimátoru je kolimátor vytvořený pomocí jednoho sférického zrcadla. Výstupní apertura monochromátoru je umístěna do ohniska zrcadla. Ohnisková vzdálenost je definována jako vzdálenost od vrcholu zrcadla, v níž světlo přicházející z nekonečně vzdáleného zdroje je soustředěno do jediného bodu. Z principu obráceného chodu toho lze využít k vytvoření rovnoběžného svazku umístěním bodového zdroje do ohniska. Ohnisková vzdálenost použitého sférického zrcadla je dána vrcholovým úhlem rozbíhavého světelného svazku, který má být kolimován a požadovaným průřezem svazku po jeho kolimaci. Označíme-li symbolem D požadovaný průměr světelného svazku a symbolem α vrcholový úhel světelného kužele, určí se ohnisková vzdálenost f následujícím způsobem:

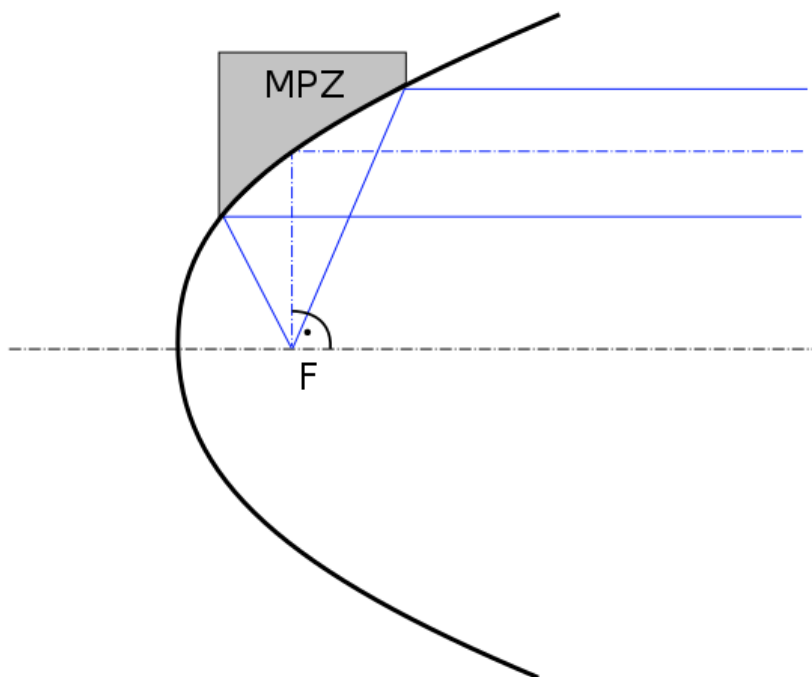
$$f = \frac{d}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}. \quad (3.3.1)$$

Komerční zrcadla jsou vyráběna pouze v omezené řadě ohniskových vzdáleností. Ohnisková vzdálenost se proto zvolí tak, aby byl průřez svazku nejbližší požadovanému (tak aby bylo zaručeno pokrytí plochy studovaného vzorku).

Zásadní nevýhodou sférického zrcadla je nutnost pootočení zrcadla tak, aby se zabránilo stínění kolimovaného svazku světelným zdrojem. Světelný svazek tak dopadne na zrcadlo pod větším úhlem a začnou se projevovat vady zobrazení. Tím je snížena úroveň kolimace světelného svazku. Kolimované světlo se také vrací téměř zpět směrem ke zdroji světla, konstrukčně je tak nutné vyřešit přesměrování kolimovaného světelného svazku žádaným směrem (většinou použitím doplňkového rovinného zrcadla).

3.3.2. Mimoosové parabolické zrcadlo

Mimoosové parabolické zrcadlo lze navrhnout obdobným způsobem jako zrcadlo sférické, výhodou ale je, že pro paraboloid nevznikají vady zobrazení pro větší úhly mezi optickou osou soustavy a osou parabolického zrcadla (to platí pouze pro bodový světelný zdroj v ohnisku zrcadla, parabolická zrcadla nejsou vhodná k zobrazování). Z paraboloidu je pro mimoosové parabolické zrcadlo vybrána část, kterou neprochází osa rotace paraboloidu (viz obrázek 3.3.1, ve kterém je uvedeno zrcadlo s úhlem natočení optické osy vůči kolimovanému svazku rovným 90°). Lze si povšimnout, že ohnisková vzdálenost mimoosového parabolického zrcadla je jiná, než ohnisková vzdálenost původní paraboly). Výhodou tohoto systému je eliminace stínění světelného zdroje, přičemž nenastane žádná deformace kolimovaného svazku.



Obr. 3.3.1: Princip funkce mimoosového parabolického zrcadla (MPZ) s úhlem odklonu světelného svazku rovným 90° . F označuje ohnisko paraboly. Osa divergentního svazku vycházejícího z ohniska bude kolmá na kolimovaný svazek vytvořený vybranou částí zrcadla.

Mimoosové uspořádání kolimátoru umožňuje lépe směřovat kolimovaný svazek do dalších částí ISRM. Kolimovaný svazek pokračuje od zrcadla kolimátoru výrazně odlišným směrem od směru divergentního svazku a nehrozí proto žádné stínění držáky, či jinými díly přístroje. Ohniskovou délku zrcadla lze určit stejným způsobem jako pro sférické zrcadlo, tj. vztahem (3.3.1).

3.4. DĚLIČ SVĚTELNÉHO SVAZKU

Stejně jako většina konvenčních SR přístrojů byly dosavadní ISRM konstruovány pro kolmý dopad světelného svazku na vzorek. U konvenčních SR je kolmý dopad nahrazován velmi malým úhlem dopadu, zamezí se tak nevýhodě kdy světelný svazek před i po dopadu na vzorek sdílí optickou dráhu, což je z hlediska konstrukce (stínění jednotlivých optických prvků) nezanedbatelná komplikace. Malá odchylka od dokonale kolmého dopadu je zanedbatelná a eventuální nevýhody jsou nad míru převýšeny výhodami jednodušší konstrukce.

Široký světelný svazek ISRM neumožňuje takovýto přístup, protože by došlo ke stínění. Optické prvky by musely být buď velmi daleko od sebe, nebo by úhel dopadu musel být větší. Ani jedno řešení tak není úplně příznivé. Většina ISRM je proto konstruována na kolmý dopad s využitím děliče. Protože se světlo od děliče odrazí, následně se odrazí také od vzorku a projde opět děličem, je potřeba určit ideální dělicí poměr děliče.

Určení ideálního dělicího poměru děliče je otázka jednoduchého hledání extrému funkce

$$I_1 = I_0(R(1-R))R_v, \quad (3.4.1)$$

kde I_0 je zdrojová intenzita, I_1 je intenzita po průchodu světla systémem, R_v je odrazivost vzorku a R je odrazivost děliče. Propustnost děliče je definována jako $1-R$, absorpce světla děličem je zanedbána. Lokální extrém lze určit, když položíme derivaci této funkce rovnu nule:

$$0 = \frac{d(I_0(R(1-R))R_v)}{dR} = I_0(1-2R)R_v. \quad (3.4.2)$$

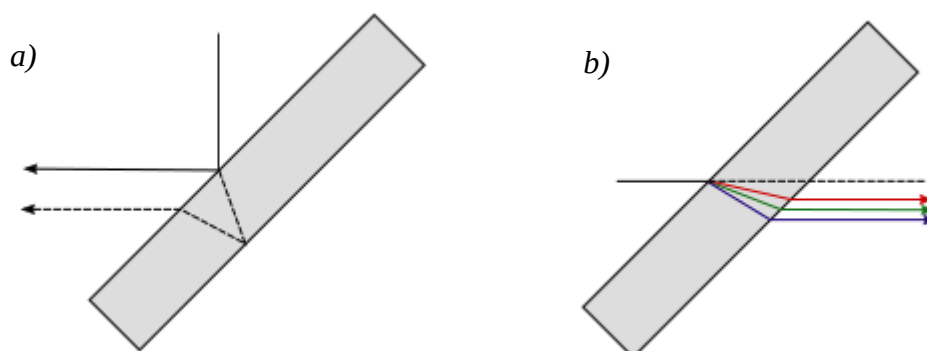
Protože je I_0 i R_v jsou obecně nenulové konstanty (respektive $I_0 = 0$ je triviální řešení, kdy do systému nepřichází žádné světlo a $R_v = 0$ znamená absenci vzorku), hledaná derivace bude rovna nule, když bude $R = 0,5$ tj. odrazivost děliče bude 50% a tedy jeho propustnost také 50%. Určení, zda v hodnotě 0,5 je lokální maximum či minimum, je již otázka jednoduché matematiky. Ukáže se, že 0,5 skutečně je maximum funkce tj. nejvyšší efektivitu dosáhne dělič s dělicím poměrem 50/50.

I ideální dělicí poměr děliče 50/50 stále znamená ztrátu 75% intenzity světelného svazku v systému. Ztráta intenzity je cenou za kvalitu zobrazení. Konstrukce děliče je také velmi důležitým faktorem správné funkce přístroje. Zásadním požadavkem je, aby dělič stejně jako všechny ostatní díly pracoval v celém požadovaném spektrálním rozsahu, neovlivňoval zobrazení vzorku na čip měřicí CCD kamery a aby byly v systému minimalizovány sekundární odrazy od nedělicích ploch děliče. Je rovněž potřeba zaručit lineární závislost intenzity detekované CCD čipem měřicí kamery na odrazivosti měřeného vzorku.

Z dostupných variant děličů se ukázaly být nejvhodnější dvě varianty děličů:

3.4.1. Dělicí deska

Dělič typu dělicí desky má tvar planoparalelní desky, na jejíž jedné ploše byla vytvořena dělicí vrstva. Pro ISRM je v této podobě nepoužitelná, protože tento typ děliče je postižen dvěma problémy. První z nich je vytvoření sekundárního obrazu na čipu měřicí CCD kamery, který vzniká odrazem na nedělicí ploše děliče, a který je posunutý vůči primárnímu obrazu (obrázek 3.4.1a)). Tím znehodnotí měřený signál.



Obr. 3.4.1: Problémové faktory destičkového děliče. a) Parazitní odrazy od nedělicího rozhraní, b) disperze světla.

Jednoduchým řešením odstraňujícím tento první problém je použití destičky mírně klínovitého tvaru. Její klínovitost se zvolí tak, aby bylo světlo ze sekundárního odrazu směřováno mimo optickou dráhu přístroje a sekundární obraz se tak eliminuje. Nevýhodou tohoto řešení je ovlivnění směru světelného svazku, který děličem prochází. To je ale možné kompenzovat dalšími klíny (takové řešení je popsáno v podkapitole 6.5).

Druhý problém je, že planparalelní deska, pokud na ni světlo nedopadá pod pravým úhlem, posouvá světelný svazek (viz obrázek 3.4.1b)). Zásadní komplikací je skutečnost, že toto posunutí je závislé na indexu lomu materiálu děliče, který je obecně závislý na vlnové délce světla. To znamená, že také zmíněné posunutí je závislé na vlnové délce. To má za následek posouvání obrazu na čipu CCD v průběhu měření, což znemožňuje správné přiřazení mezi detekovanou odrazivostí a polohou na vzorku (pro každou vlnovou délku se bude určovat odrazivost na jiném místě vzorku). Posuv obrazu je třeba kompenzovat zařazením dalších desek. Řešením tohoto problému je také minimalizace tloušťky děliče. Hodnotu posuvu světelného svazku lze určit z jednoduchých geometrických úvah:

$$x = \frac{d}{\cos \theta} \sin(\theta - \theta'), \quad (3.4.3)$$

kde x je hledané posunutí, d je tloušťka desky, úhel θ je úhel dopadu svazku na dělič a θ' je úhel lomu. S využitím Snellova zákona (2.1.2) (index lomu desky je N_2 , prostředí před i za deskou je vzduch, tedy $N_1 = 1$):

$$x = \left(1 - \frac{\cos \theta}{\sqrt{N_2^2 - \sin^2 \theta}} \right) d \sin \theta. \quad (3.4.4)$$

Vzhledem k rozpětí možných úhlů θ (0° – 90°) mohou funkce *sinus* i *cosinus* nabývat hodnot mezi 0 a 1, hodnota indexu lomu běžných materiálů je obecně větší než 1. Z toho plyne, že výraz v závorce vztahu (3.4.4) vždy leží v rozpětí hodnot od 0 do 1, stejně jako $\sin \theta$ leží v rozpětí hodnot 0 až 1. Posunutí dráhy světelného svazku bude tedy menší, nejvýše rovno tloušťce planparalelní desky. Pro úhel 45° a běžné indexy lomu optických materiálů v rozpětí 1–2 se bude hodnota posunutí svazku pohybovat přibližně v rozmezí 0%–40% tloušťky děliče.

Pro posouzení velikosti posunutí a také vlivu změny indexu lomu pro různé vlnové délky bude vhodné dosadit do vzorce (3.4.4) hodnoty reprezentující nejčastější komerční případy těchto děličů. Pro $n_{350} = 1,5392$ a $n_{1100} = 1,5062$ platné pro běžné optické sklo BK7 (hodnoty získány z internetové databáze [10]) vychází $x_{350} = 0,3414 d$ a $x_{1100} = 0,3070 d$, rozdíl Δx je pak roven $0,0344 d$. Pro běžnou tloušťku děliče 10 mm to znamená posunutí o celých $344 \mu\text{m}$ mezi obrazy příslušícími světlu výše vybraných vlnových délek, pro dělič tloušťky 1 mm by šlo stále o posunutí rovné $34,4 \mu\text{m}$, což je hodnota stále velmi velká a lze očekávat, že požadavky na rozlišení přístroje budou větší. Aby došlo ke snížení rozdílu diskutovaného posuvu na přijatelnější hodnotu, musela by tloušťka děliče být srovnatelná s vyžadovaným

rozlišením, tj. jednotky, maximálně několik desítek mikrometrů. V případě větších spektrálních rozsahů přístrojů, např. UV–VIS–NIR, nebo některých optických materiálů, mohou být posuvy ještě větší a dělič by musel být ještě tenčí. Pro určité aplikace skutečně existují děliče tloušťky v jednotkách mikrometrů.

3.4.2. Membránový dělič světelného svazku

Moderní obdobou děliče tvořeného planparalelní deskou je membránový dělič. V principu se totiž jedná o planparalelní desku o velmi malé tloušťce několika mikrometrů. Membránový dělič je tvořen celulosovou membránou nataženou na rámečku. Na membráně může být vytvořena dělicí vrstva, aby bylo možné získat požadovaný dělicí poměr. Stejně jako u dělicí desky, také u membránového děliče dochází k vytvoření sekundárního odrazu na druhém rozhraní děliče. Malá tloušťka děliče však způsobuje, že vzdálenost, o kterou je sekundární odraz posunut, je minimální.

V závislosti na cíleném laterálním rozlišení konstruovaného ISRM může být membránový dělič velmi výhodnou volbou, protože tloušťka membrány se pohybuje v jednotkách mikrometrů. Jak bylo ukázáno v oddíle 3.4.1, posuv svazku vlivem planparalelní destičky je ovlivněn její tloušťkou. Protože tloušťka membrány je pouze několik mikrometrů, také posuv světelného svazku je v řádu několika mikrometrů. Rozdíl v posunutí světelného svazku vlivem disperze materiálu membrány je zanedbatelný, pro mnoho aplikací bude také celkový posuv světelného svazku nepozorovatelný.

Jednou nevýhodou membránového děliče může být fakt, že v malé tloušťce membrány dochází ke vzniku interferenčních jevů a dělicí poměr se výrazně mění v celém použitém spektrálním rozsahu. Vzhledem ke skutečnosti, že měření pomocí ISRM je relativní to ale není příliš velký problém. Zásadnější problém představuje to, že materiál komerčně vyráběných membránových děličů neumožňuje jejich použití v UV oblasti pod 250 nm. V praxi se nevyrábí děliče pro kratší vlnové délky než 300 nm.

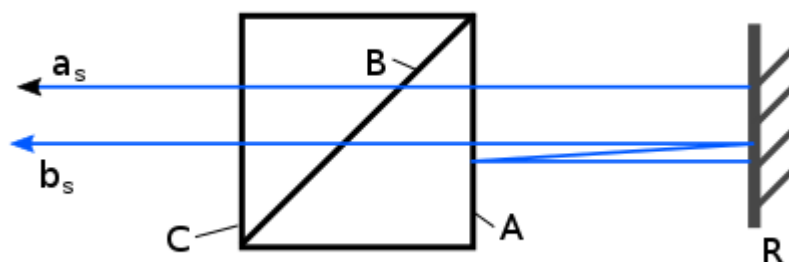
3.4.3. Dělicí krychle

Další konstrukční řešení děliče je dělič tvaru krychle, která je rozříznuta kolmo na stěnu a podél jedné stěnové uhlopříčky. Následně je znovu slepena. Dělicí vrstva se nachází uvnitř krychle, všechny vnější stěny jsou kolmé na dopadající a vystupující světelný svazek.

Děliče této konstrukce se jeví jako vhodná alternativa k membránovým děličům – dělicí vrstva je také velmi tenká a dělič tak také nezpůsobuje žádné detekovatelné posuvy světelného svazku.

Problematické se mohou být vnější stěny krychle, které představují další rozhraní a i přes pokročilé antireflexní vrstvy na ně nanesené mohou negativně ovlivnit měření (obzvláště v širokém spektrálním rozsahu). Část světelného svazku odraženého od studovaného vzorku se může na rovinné ploše děliče odrazit zpět na vzorek a vzorek tak neuniformně „přisvítit“, protože je ale intenzita tohoto svazku již závislá na odrazivosti studovaného vzorku, poruší se linearita závislosti intenzity zobrazeného světelného svazku na odrazivosti měřeného vzorku.

Je jasné, že použití tohoto typu děliče vnese do detekovaného signálu chybu. Na obrázku 3.4.2 je znázorněn dělič, na jehož prvním rozhraní došlo k jednomu odrazu světelného svazku.



Obr. 3.4.2: Vícenásobné odrazy mezi děličem a vzorkem (dráha svazku b je naznačena schematicky, v realitě svazek postupuje v jedné dráze). A – první rozhraní děliče, B – dělicí rozhraní děliče, C – třetí rozhraní děliče, a_s – světelný svazek, který projde děličem přímo, b_s – světelný svazek, který se jednou odrazí na prvním rozhraní děliče, R – studovaný vzorek

V případě svazku a_s na obrázku je intenzita světelného svazku za děličem lineárně závislá na odrazivosti studovaného vzorku:

$$I_1 = I_0 R A B C, \quad (3.4.5)$$

kde R je hledaná absolutní odrazivost studovaného vzorku, I_0 je intenzita světelného svazku těsně před dopadem na vzorek, I_1 je celková intenzita světelného svazku po průchodu děličem, A , B a C jsou propustnosti jednotlivých rozhraní děliče (B je dělicí rozhraní děliče). Reálně se ale světelný svazek a_s na rozhraní A rozdělí a v celém systému přibude parazitní světelný svazek b_s . Intenzita za děličem je následně rovna součtu intenzit obou světelných svazků:

$$I_1 = I_0 R A B C + I_0 R (1 - A) R A B C. \quad (3.4.6)$$

Teoreticky je možné takto pokračovat dále, také světelný svazek b_s se na rozhraní A rozdělí na dvě části a opět dojde k částečnému odrazu. Pokud se započítá další odraz, výraz bude mít tvar:

$$I_1 = I_0 R A B C + I_0 R (1 - A) R A B C + I_0 R^2 (1 - A)^2 R A B C. \quad (3.4.7)$$

Celkový součet všech odrazů lze popsat jako sumu:

$$I_1 = I_0 R A B C \sum_{n=0}^{\infty} R^n (1 - A)^n. \quad (3.4.8)$$

Jde o nekonečnou geometrickou řadu, kde $a = I_0 R A B C$ a $q = R(1 - A)$. R i rozdíl $1 - A$ bude vždy menší než 1, podmínka určení součtu nekonečné řady je splněna. Intenzita světla, které tímto způsobem projde děličem je:

$$I_1 = \frac{a}{1-a} = \frac{I_0 R A B C}{1-R(1-A)} = \frac{I_0 R A B C}{1-R+R A}. \quad (3.4.9)$$

Odrazivost rozhraní A a C u komerčních děličů je menší než 0,5%, propustnost je tedy $A = C = 0,995$. Na základě toho platí, že poslední člen v (3.4.7) bude o více než dva řády menší než první člen, kdy světlo projde děličem přímo.

Jak bude podrobněji ukázáno v oddíle 3.8.2, hledaná odrazivost se ze signálu získá podílem s intenzitou I_1 naměřenou na referenčním vzorku se známou odrazivostí R' . Při měření technikou ISR se hledá relativní odrazivost R/R' . V případě vztahu (3.4.5) při podílu intenzit I_1/I_1 dojde k odstranění všech veličin kromě podílu R/R' , v případě (3.4.9) k tomu ale nedojde, výsledný poměr intenzit bude

$$\frac{I_1}{I_1'} = \frac{\frac{I_0 R A B C}{1-R+R A}}{\frac{I_0 R' A B C}{1-R'+R' A}} = \frac{\frac{R}{1-R+R A}}{\frac{R'}{1-R'+R' A}} = \frac{R}{R'} \frac{1-R'+R' A}{1-R+R A}. \quad (3.4.10)$$

Lze vidět, že chyba v měření relativní odrazivosti je dána zlomkem:

$$\frac{1-R'+R' A}{1-R+R A}. \quad (3.4.11)$$

Jsou-li odrazivosti R a R' identické, zlomek (3.4.11) bude roven 1 a výsledkem bude skutečně poměr R a R' . Numerický rozbor ukázal, že k největší chybě v měření dojde tehdy, když se budou tyto odrazivosti lišit nejvíce. Absolutní odrazivost světla může nabývat hodnot od 0 do 1, dosadí-li se za $R = 0$ a $R' = 1$ (situace, která může při měření téměř reálně nastat pro antireflexní vrstvu a velmi odrazivý referenční vzorek), bude zlomek roven A . Relativní odrazivost tedy bude vynásobena propustností čelního rozhraní děliče. V případě, kdy $R = 1$ a $R' = 0$, bude určená relativní odrazivost vynásobena koeficientem $1/A$.

Propustnost kolmých rozhraní komerčních děličů tvaru krychle se velmi blíží hodnotě 1 (Thorlabs Inc, udává odrazivost menší než 0,005, hodnota propustnosti A je tedy 0,995, nebo větší), chyba v určení relativní odrazivosti je tedy maximálně 0,5%. Jak lze vidět, kvalita antireflexní vrstvy je velmi důležitá.

Stejný případ nastane pro rozhraní C . Samozřejmě dojde také ke kombinaci odrazů světelného svazku od vzorku, od rozhraní A a od rozhraní C (rozhraní B směřuje parazitní svazky mimo vzorek R). Svazky vzniklé odrazy od rozhraní C budou mít intenzitu sniženou průchody dělicí vrstvou B , odchylka naměřené intenzity světla tedy bude výrazně nižší, než v případě odrazů pouze od rozhraní A . Celkovou chybu vnesenou děličem by mělo být možné odstranit měřením odrazivosti děliče jako celku, které zahrne odrazivost všech rozhraní a z měřeného signálu následně hledanou relativní odrazivost vypočítat.

Děliče tvaru krychle jsou běžně používány v konvenčních reflektometrech a také minimálně v jednom případě v reflektometru zobrazovacím [7]. Důležité je, aby antireflexní vrstva plnila svou funkci správně v celém požadovaném spektrálním rozsahu.

Výběr variant komerčních děličů typu dělicí krychle je širší, než v případě membránového děliče, dělicí poměr je spektrálně stabilnější a v principu lze použít celou řadu optických materiálů, z nichž jsou tyto děliče zhotovovány. Tyto děliče proto také komerčně existují i pro UV či IR spektrální oblasti. Nejvíce omezujícím faktorem použití těchto děličů je kvalita antireflexní vrstvy na nedělicích rozhraních. Zatímco membránové děliče lze v principu použít i v širším spektrálním rozsahu, než pro jaký jsou navrženy (pouze za cenu ztráty intenzity), u děliče tvaru krychle je jeho použití dáno spektrální odrazivostí antireflexní vrstvy děliče.

3.4.4. Dělič „Polka dot“

Ve výčtu nejběžnějších děličů zbývá pouze jediný, je vhodné jej také zmínit.

Tento dělič je stejné konstrukce jako dělič deskový, místo dělicí vrstvy je ale dělení svazku řešeno na dělicí ploše střídáním čistého povrchu materiálu substrátu a plošek pokovených. Tento typ děliče je jednoznačně nevhodný pro ISRM, protože u něj dochází k deformaci obrazu.

3.5. ZOBRAZENÍ

V principu je možné použít celou řadu klasických konceptů zobrazení, technika ISR v tomto není nijak specifická. Návrh zobrazení se odvíjí od požadovaných parametrů přístroje ISRM. Důležité parametry jsou požadované zvětšení, laterální rozlišení, požadované zorné pole, rozměr čipu použité kamery a spektrální rozsah celého zařízení.

Jelikož všechny ISRM pracují v širokém spektrálním rozsahu, disperze světla materiálů refraktivních prvků zobrazovací soustavy může hrát v zobrazení velmi velkou roli. Tomu tak není v případě použití reflexních prvků. Použití reflexní optiky i přes její nevýhody zásadním způsobem snižuje složitost přístrojů.

V případě přístrojů konstruovaných na ÚFI se osvědčilo zobrazení jedním sférickým zrcadlem. Tento způsob zobrazení je vhodný pro aplikace, kde není požadované extrémně vysoké rozlišení a je požadováno relativně velké zorné pole. Nevýhodou jsou rozměry optické sestavy – nejvýhodnější se totiž ukazují předmětové délky okolo 1 m. Sofistikované, dobře korigované refraktivní objektivy by mohly tyto rozměry snížit na rozměry několika málo desítek centimetrů, ale za poměrově výrazně vyšší pořizovací cenu. S potřebou korigovat široké spektrum vlnových délek roste komplexnost objektivu a refraktivní optika obecně více limituje použitelný spektrální rozsah.

V literatuře je možné se setkat s řešením využívajícím mikroskopového objektivu. Jedná se o aplikace s velkým rozlišením a relativně malým zorným polem. Zařízení není navrženo pro použití v UV oblasti [5]. Při takových požadavcích je využití mikroskopového objektivu velmi výhodné.

3.6. MĚŘICÍ KAMERA

Volba kamery je velmi obsáhlé téma – kamery mají mnoho důležitých parametrů. Nejdůležitější vlastností kamery pro použití v ISRM je lineární odezva na dopadající intenzitu světla. Moderní CCD kamery požadavek na tuto vlastnost splňují obecně velmi dobře. Lineární odezvu CCD čipu může nejvíce ovlivnit jeho ochrana proti přetečení. Saturované pixely jsou při měření nežádoucí. V případě ISRM je expoziční doba kamery volena tak, aby k přetečení nedošlo, tato ochrana u kamery ISRM tedy není potřebná. U moderních čipů s ochranou proti přetečení je při měření potřeba volit expoziční dobu tak, aby se hodnota měřeného signálu nacházela v lineární oblasti čipu, lze tedy u nich využít menší část dynamického rozsahu oproti čipům bez ochrany.

S linearitou odezvy čipu kamery souvisí potřeba vyčítání snímků v nekomprimovaném formátu (většinou označován jako „raw“), aby byl zaručen lineární vztah mezi naměřeným signálem a hodnotou měřené intenzity.

Pro návrh zobrazovací sestavy ISRM jsou důležité velikost čipu a velikost pixelů. Velikost čipu definuje zvětšení zobrazovací sestavy – obraz požadované plochy vzorku je potřeba zobrazit na čip kamery. Velikost pixelů čipu definuje maximální dosažitelné laterální rozlišení přístroje (to může ještě být omezeno kvalitou zobrazovací sestavy).

Kameru je potřeba zvolit tak, aby její kvantová účinnost byla dostatečná v celém požadovaném spektrálním rozsahu přístroje.

Další parametry kamery mohou do jisté míry ovlivnit přesnost měření – bitová hloubka záznamu určuje rozlišitelnost úrovní měřené intenzity, šum zesilovačů vnáší do naměřené hodnoty signálu jistou neurčitost, je tedy vhodné volit kamery s menším šumem (což je většinou spojeno s delším vyčítáním snímku, tj. je nutné volit jistý kompromis mezi celkovou délkou měření a úrovní šumu), temný proud může zamezit detekci velmi slabých signálů, proto je vhodné použití kamery s chlazeným čipem.

Vzhledem k požadovaným parametrům se často jako vhodné jeví kamery určené pro astronomii, detailnější volba ale závisí na přesných parametrech navrhovaného ISRM.

3.7. PROPOJENÍ JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ PŘÍSTROJE

Vzhledem k tomu, že technika ISR vyžaduje splnění řady požadavků, je otázkou, jaký přístup při návrhu přístroje zvolit. V případě komerčních zařízení je propojení jednotlivých částí přístroje provedeno výrobcem v rámci skříně přístroje a v zásadě lze toto zařízení připojit pouze k elektrické síti.

V určitých případech může být výhodné některé podsystémy (monochromátor, lampa, kamera...) získat již jako hotové celky plně funkční. V takovém případě je nezbytné všechny části celého přístroje patřičně propojit. Tak tomu je i v případě přístrojů popsanych v této práci.

3.7.1. Ustavení přístrojů

V principu lze jednotlivé části přístroje ISRM k sobě připojit pouze prostřednictvím světelného svazku, ne nutně mechanicky (např. výstupní světlo monochromátoru je potřeba směřovat na zrcadlo kolimátoru, tyto součásti nemusí být nijak pevně mechanicky svázány). Tento přístup s sebou nese zásadní problémy. V prvé řadě se jedná o přístup nechtěného světla do sestavy. Hůře řešitelným problémem je správné vzájemné seřízení částí přístroje, obzvláště z dlouhodobého hlediska. Použitím jednoho, či dvou rovinných zrcadel je sice možné velmi snadno změnit směr světelného svazku a kompenzovat tak celou řadu nepřesností v ustavení obou částí, nicméně v delším časovém intervalu se toto propojení může lehce porušit. Problémem mohou být otřesy nebo potřeba manipulovat s některou částí přístroje (např. výměna vzorků). Obecně je proto tento přístup vhodný pouze pro dočasné experimentální sestavy sloužící k ověření funkčnosti konceptu řešení dané úlohy apod.

3.7.2. Mechanické spojení

Většina komerčních optických přístrojů, obzvláště takové, které většinou slouží jako podsestavy větších celků (monochromátor, kamera apod.), má již z výroby systémy k upnutí dalších částí. Pomocí nich je možné celý přístroj zkompletovat tak, aby byl velice tuhý a nehrozilo by náhodné porušení nastavení přístroje. Parametry upevnění jsou většinou k dispozici od výrobce, je tedy možné sestavu navrhnout velmi kompaktně, protože geometrická dráha světelného svazku a další parametry komerčních podsestav jsou dobře definovány. Jedná se v podstatě o nejlepší způsob propojení podsestav přístroje, kterým se zaručí vytvoření jednotného celku bez přebytečných optických prvků nutných k přenosu světla, či dodatečnému seřízení světelného svazku.

3.7.3. Kabel optických vláken

Není-li možné (většinou z důvodu omezeného prostoru) všechny podsestavy přístroje propojit mechanicky, lze s výhodou využít kabelů optických vláken. Protože je kabel v obou podsystémech přístroje pevně fixován, nehrozí ani v tomto případě náhodné porušení nastavení přístroje. Nevýhodou je však potřeba řešit navázání světelného svazku do kabelu optických vláken, které není bezeztrátové. Cenou za větší volnost v umístění jednotlivých podsestav přístroje je tedy ztráta intenzity světelného svazku.

Výhodou může také být možnost sdílení podsestav (např. zdroje světla) mezi více přístroji, neboť je možné pomocí normalizovaných konektorů kabely lehce přepojit. Jedná se tedy o velmi variabilní způsob propojení podsestav.

3.8. ZÁZNAM A ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU

I přes minimalizaci počtu optických prvků v ISRM, zobrazovací optické díly vždy ovlivní intenzitu procházejícího či odraženého světla. Vliv optických prvků nemusí být uniformní v celé jejich ploše, odezva jednotlivých pixelů CCD čipu se může lišit a rovněž rozložení intenzity zdrojového svazku v jeho průřezu nemusí být dokonale uniformní. Přímé určení

hodnoty absolutní odrazivosti vzorku v takovémto případě obecně není možné. Všechny výše uvedené vlivy je možné odstranit srovnáním signálu od studovaného vzorku se signálem od známého referenčního vzorku. Příkladem takového referenčního vzorku je monokrystal křemíku (monokrystal křemíku je velmi často používán z důvodu jeho dosažitelnosti a známosti optických konstant).

3.8.1. Volba expoziční doby kamery

Expoziční doba, která je pro danou vlnovou délku užitého světla nastavena, je závislá na kvantové účinnosti kamery, intenzitě světelného svazku zdroje, celkové propustnosti a odrazivosti prvků optické sestavy ISRM a na aktuálním studovaném vzorku. Expoziční doba se volí pro každou vlnovou délku zvlášť, a to experimentálně.

U většiny studovaných vzorků vrstev platí, že materiál referenčního vzorku je také podložkou pro studovanou vrstvu. Není-li vrstva navržena jako vrstva reflexní, lze předpokládat, že odrazivost vrstvy bude spíše nižší než odrazivost čisté podložky. Z toho důvodu se u přístrojů popisovaných v této práci osvědčilo nastavení expozičních časů tak, aby při měření referenčního vzorku signál nabýval přibližně hodnoty 80% saturace čipu. Toto nastavení se ukazuje jako nejuniverzálnější a funguje pro největší soubor studovaných vzorků vrstev na dané podložce.

Experimentální proces určení potřebných expozičních dob pro jednotlivé použité vlnové délky je automatizován pomocí algoritmu s použitím referenčního vzorku. Aby bylo zaručeno, že u zvolené expoziční doby nenastane nikde ve studované ploše přetečení, kontroluje se vždy maximální hodnota signálu v celé ploše vzorku, ta ale nesmí být způsobena dodatečnými jevy (výstřelový šum, rozptyl světla na prachových částicích atp.). Hledané maximum signálu podél plochy by mělo být relativně plytké, protože jak referenční vzorek, tak osvětlovací svazek jsou v průřezu dobře uniformní. Je-li gradient signálu v okolí nejintenzivnějšího bodu příliš velký, jedná se pravděpodobně o náhodné poškození obrazu, jeho hodnota je v algoritmu ignorována a použije se další nejvyšší hodnota signálu, která splní podmínku malého gradientu signálu v jeho okolí.

Takto vybraná hodnota signálu S_1 pro expoziční čas t_1 ze snímané plochy referenčního vzorku je porovnána s požadovanou hodnotou signálu (nejčastěji výše uvedených 80% saturace signálu). Pokud se hodnota S_1 liší od požadované hodnoty o více než je povolená mez, je určena nová expoziční doba t_p na základě předpokladu lineární závislosti měřeného signálu na čase užitím lineární extrapolace (případně interpolace v závislosti na velikosti signálu S_1):

$$t_p = \frac{S_p - S_0}{S_1 - S_0} t_1, \quad (3.8.1)$$

kde S_p je požadovaná hodnota signálu pro referenční vzorek a S_0 je bias kamery (nenulová hodnota pro expoziční čas $t_0 = 0$ s, která je nastavena elektronikou kamery tak, aby byla zaručena správná polarita náboje na elektronice jednotlivých pixelů kamery před měřením).

Správnost nové expoziční doby t_p je ověřena vytvořením nového snímku při použití této expoziční doby. Pokud se hodnota maximálního signálu opět odchyluje od požadované hodnoty více, než je povolená mez, podle vztahu (3.8.1) se znovu určí nová expoziční doba. Takto se postupuje, dokud signál S_1 neleží v nastaveném rozmezí okolo požadované hodnoty signálu.

Algoritmus také kontroluje, zda vypočítaná expoziční doba není menší než nejmenší nastavitelná doba u kamery (aby nedošlo k zacyklení – kamery totiž při zadání menší expoziční doby, než je minimální podporovaná, často nastavují automaticky hodnotu expoziční doby minimální povolené).

3.8.2. Měřený signál

Velikost signálu zaznamenaného (k,u) -tým pixelem CCD čipu je úměrná odrazivosti vzorku a intenzitě zdrojového světelného svazku. Na celý systém mají vliv ještě další jevy. Obecně lze zaznamenaný signál zapsat jako:

$$S_{Mi}^{k,u}(\lambda, t_i) = I_o(\lambda, t_i) \eta^{k,u}(\lambda) R_i^{k,u}(\lambda) + b^{k,u} I_o(\lambda, t_i) + D^{k,u}(\lambda), \quad (3.8.2)$$

kde index „ M “ označuje měřicí větev ISRM, index $i = 1$ označuje veličiny pro studovaný vzorek a $i = 0$ pro referenční vzorek. I_o označuje intenzitu zdrojového svazku, $\eta^{k,u}$ značí přístrojovou funkci reflektometru, tj. vliv optických součástí reflektometru a kvantové účinnosti kamery. R_i označuje lokální absolutní odrazivost příslušného vzorku. Zbýlá část vztahu popisuje vliv pozadí: $b^{k,u} I_o(\lambda, t_i)$ vyjadřuje pozadí způsobené zdrojovým světlem rozptýleným na optických prvcích ve skříni přístroje ISRM. $D^{k,u}$ vyjadřuje signál pozadí nezávislý na zdrojovém svazku. Popisuje vliv elektroniky CCD kamery, tj. zdrojem signálu $D^{k,u}$ je temný proud kamery, šum zesilovačů a bias.

Aby bylo možné odstranit ze signálu nechtěný příspěvek vlivů pozadí, provádí se měření signálů pozadí. Tyto signály je možné zapsat stejně jako (3.8.2) s tím rozdílem, že absence jakéhokoli vzorku v držáku vzorků při tomto měření má za následek nulovou odrazivost, tj. $R_2^{k,u} = 0$ (pro každé k, u). Zápis zaznamenaného signálu je pak jednodušší než v ostatních případech:

$$S_{M2}^{k,u}(\lambda, t_2) = b^{k,u} I_o(\lambda, t_2) + D^{k,u}(\lambda). \quad (3.8.3)$$

Význam veličin je identický jako ve výrazu (3.8.2), pouze index $i = 2$ označuje měření pozadí. Protože se pozadí skládá ze dvou částí, kdy jedna je lineárně závislá na intenzitě zdrojového světelného svazku a druhá není, jejich odstranění je třeba dělat ve dvou krocích. Nejprve se ode všech signálů, tj. S_{M0} , S_{M1} a S_{M2} , odečtou takzvané „dark frame“ snímky – snímky vytvořené kamerou se stejnými parametry (expoziční doba, zesílení) jako při snímání aktuálního snímku, ale bez otevření závěrky kamery. Na čip se tedy nedostane žádné světlo a je zaznamenan pouze vliv elektroniky kamery – temný proud, bias, šum zesilovačů apod. – tedy signál $D^{k,u}$. Tyto snímky je možné sejmut hned po uložení aktuálního snímku, nebo je

možné, pro urychlení celého měření, snímky vytvořit předem a pouze je pak odečítat. Podstatné je, aby „dark frame“ snímek vznikl za stejných podmínek, tj. za stejné teploty čipu a expoziční doby.

Na jednu stranu je odstranění vlivu elektroniky nejjednodušší, na druhou stranu nelze jej odstranit dokonale, protože jde o náhodný proces s relativně malým rozptylem. Nejúčinnějším způsobem odstranění náhodného šumu ze signálu je průměrování signálu. Problém průměrování tkví v tom, že je potřeba provést několik snímků za identických podmínek. Vzhledem k relativně velké délce celého měření s přístrojem ISRM zatím nikdy nebylo k tomuto kroku přistoupeno. Ve všech případech byl rozptyl šumu vzhledem k naměřeným hodnotám signálům zanedbatelný.

Po odečtení vlivu elektroniky zůstanou ve výrazech (3.8.2) a (3.8.3) pouze signály, které jsou lineárně závislé na intenzitě zdrojového světelného svazku. V případech, kdy je výstup světelného zdroje dostatečně stabilní, je možné signál pozadí S_{M2} odečíst přímo od signálů studovaného a referenčního vzorku (S_{M0} , S_{M1}). Hledanou relativní odrazivost je pak možné určit jako podíl těchto rozdílů:

$$R^{k,u}(\lambda) = \frac{S_{M1}^{k,u}(\lambda) - S_{M2}^{k,u}(\lambda)}{S_{M0}^{k,u}(\lambda) - S_{M2}^{k,u}(\lambda)} = \frac{I_o(\lambda) \eta^{k,u}(\lambda) R_1^{k,u}(\lambda)}{I_o(\lambda) \eta^{k,u}(\lambda) R_0^{k,u}(\lambda)} = \frac{R_1^{k,u}(\lambda)}{R_0^{k,u}(\lambda)}. \quad (3.8.4)$$

Jak bylo řečeno, tento postup je možné použít pouze tehdy, když není intenzita zdrojového světelného svazku závislá na čase (ve výrazu (3.8.4) nevystupují časy t_0 , t_1 či t_2 , neboť signály nejsou na čase závislé). Obecně však i u stabilizovaných světelných zdrojů intenzita jejich svazku s časem fluktuuje, se změnou této intenzity je proto třeba počítat. Stejně jako konvenční reflektometry i ISRM je možné postavit jako dvoukanálový přístroj. Nezávisle na technickém řešení je obecně možné popsat signál z referenční větve přístroje jako:

$$S_{Ri}(\lambda, t_i) = I_o(\lambda, t_i) \eta_R(\lambda), \quad (3.8.5)$$

kde η_R označuje vliv prvků zařazených v referenční větvi na signál. Index i opět nabývá hodnoty podle toho, zda je signál zaznamenáván při měření studovaného, nebo referenčního vzorku, případně při měření pozadí.

Vliv časově nestálé intenzity zdrojového svazku I_o lze za pomoci signálu referenční větve odstranit podílem příslušných signálů měřicí a referenční větve (stejný index i). Vzniknou tak korigované signály P_{Mi} :

$$\begin{aligned} P_{Mi}^{k,u}(\lambda, t_i) &= \frac{S_{Mi}^{k,u}}{S_{Ri}^{k,u}} = \frac{I_o(\lambda, t_i) \eta^{k,u}(\lambda) R_i^{k,u}(\lambda) + b^{k,u} I_o(\lambda, t_i)}{I_o(\lambda, t_i) \eta_R^{k,u}(\lambda)} = \\ &= \frac{\eta^{k,u}(\lambda)}{\eta_R^{k,u}(\lambda)} R_0^{k,u}(\lambda) + \frac{b^{k,u}}{\eta_R^{k,u}(\lambda)}. \end{aligned} \quad (3.8.6)$$

Odečtením korigovaných signálů pozadí P_{M2} od korigovaných signálů studovaného a referenčního vzorku (P_{M1} a P_{M0}) je odstraněno pozadí a konečným podílem těchto rozdílů se z

výrazů odstraní všechny ostatní veličiny, kromě odrazivostí studovaného a referenčního vzorku. Tento postup lze zapsat obdobně jako původní signály při dostatečně stabilním zdroji (3.8.4):

$$R^{k,u}(\lambda) = \frac{P_{M1}^{k,u} - P_{M2}^{k,u}}{P_{M0}^{k,u} - P_{M2}^{k,u}} = \frac{\frac{\eta_R^{k,u}(\lambda)}{\eta_R^{k,u}(\lambda)} R_1^{k,u}(\lambda) + \frac{b^{k,u}}{\eta_R^{k,u}(\lambda)} - \frac{b^{k,u}}{\eta_R^{k,u}(\lambda)}}{\frac{\eta_R^{k,u}(\lambda)}{\eta_R^{k,u}(\lambda)} R_0^{k,u}(\lambda) + \frac{b^{k,u}}{\eta_R^{k,u}(\lambda)} - \frac{b^{k,u}}{\eta_R^{k,u}(\lambda)}} = \frac{R_1^{k,u}}{R_0^{k,u}}. \quad (3.8.7)$$

Výsledkem je hodnota lokální relativní odrazivosti studovaného vzorku vůči vzorku referenčnímu v oblasti na povrchu studovaného vzorku odpovídající (k,u) –tému pixelu měřicí CCD kamery.

4. DALŠÍ ZPRACOVÁNÍ DAT ZÍSKANÝCH TECHNIKOU ZOBRAZOVACÍ SPEKTROSKOPICKÉ REFLEKTOMETRIE

Ve většině případů použití techniky ISR, stejně jako u konvenční SR, je cílem určit lokální optické parametry studovaného vzorku – lokální tloušťku, lokální index lomu a lokální extinkční koeficient (poslední dva parametry se souhrnně nazývají optické konstanty). Výstupem měření je ale lokální relativní odrazivost studovaného vzorku. Jak bylo ukázáno v podkapitole 2.3, odrazivost studované vrstvy je závislá na hledaných parametrech vrstvy. Pomocí regresní analýzy měřených dat je možné ze spektrální závislosti lokální odrazivosti určit hledané lokální optické parametry. Prvním krokem je určení disperzních vztahů pro hledané optické konstanty. Nejjednodušším případem je případ, kdy jsou materiály vrstvy i podložky velmi dobře reprodukovatelné a spektrální závislosti jejich indexů lomu a extinkčních koeficientů jsou dobře známy. Hodnoty těchto závislostí jsou totiž tabelovány a jsou dostupné ve vhodných zdrojích (např. [11], také často přímo v software komerčních přístrojů). Jediné, co potom u studovaného vzorku není známé, je tloušťka vrstvy. Na základě naměřených spektrálních závislostí lokálních odrazivostí v kombinaci se známými spektrálními závislostmi optických konstant lze tloušťku vrstvy snadno určit.

V případě méně známých materiálů, nebo materiálů, jejichž výroba není dostatečně reprodukovatelná, je situace komplikovanější a výše zmíněné spektrální závislosti optických konstant se používají pouze jako výchozí pro regresní analýzu.

V nejobecnějším případě jsou spektrální závislosti optických konstant ve formě tabelovaných hodnot vyjádřeny funkcí. Nejjednodušší tvar takové funkce pro závislost indexu lomu na vlnové délce navrhl L. Cauchy:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2}, \quad (4.1)$$

kde A a B jsou konstanty. Tuto funkci lze rozšířit o další členy (s λ^4 , λ^6 atd.), případně (u materiálů se složitější spektrální závislostí indexu lomu) lze využít i jiné modernější disperzní funkce [12]. Podobným způsobem lze vyjádřit i spektrální závislost extinkčního koeficientu.

Pomocí disperzních funkcí materiálů vrstev je vytvořen numerický model pro interakci studované vrstvy se světlem (model může v pokročilých verzích zohledňovat další aspekty rozhraní jako přechodové vrstvy, či drsnost). Cílem regresní analýzy je najít hodnotu parametrů tohoto modelu tak, aby spektrální závislost odrazivosti vycházející ze zmíněného modelu odpovídala naměřené spektrální závislosti odrazivosti studovaného vzorku. Hodnoty těchto parametrů lze považovat za hodnoty, které reálně popisují optické vlastnosti charakterizovaného vzorku.

ISRM měří pouze spektrální závislost lokální odrazivosti vzorku při kolmém dopadu svazku na vzorek (tj. při jednom úhlu dopadu), takže nemůže poskytnout tak velký objem měřených veličin potřebných k charakterizaci studovaného vzorku jako například elipsometrie

(měřicí podíl amplitud p a s složek světla a fázový rozdíl mezi těmito složkami, tyto údaje se však získávají z celé plochy osvětlené měřicím světelným svazkem). V případě VASE se navíc ještě při různých úhlech dopadu měří spektrální závislosti výše zmíněných veličin. Na druhou stranu ISRM poskytuje spektrální závislosti lokální relativní odrazivosti malých oblastí povrchu vzorku, z nichž každá je zobrazena na odpovídající pixel měřicí kamery. Poskytuje tedy mnoho dat pro jednotlivé oblasti povrchu vzorku, které v souhrnu vytvářejí celkový obraz tohoto povrchu. Takto přidává další informaci, a to prostorové rozlišení podél plochy povrchu vzorku. To je výrazný přínos při studiu tenkých vrstev neuniformních v jejich optických parametrech. S výstupními daty ISRM je možné naložit různými způsoby:

4.1. „SINGLE-PIXEL“ METODA ZOBRAZOVACÍ SPEK-TROSKOPICKÉ REFLEKTOMETRIE JAKO METODA POMOCNÁ

První variantou je způsob vyhodnocení, kdy se k datům z ISR přistupuje pixel po pixelu. Protože se data zpracovávají z jednotlivých (samostatných) pixelů, používá se pro tento způsob termín „single-pixel method“, tj. metoda jednopixelová. Tato metoda se používá pro vzorky, které vykazují neuniformitu pouze v jednom z parametrů (nejčastěji to bývá tloušťka) a ostatní parametry (index lomu a koeficient absorpce) jsou konstantní. Tedy použitím nezobrazovacích metod (nejběžněji VASE) se určí spektrální závislosti optických konstant a data ISR pak slouží k určení lokální tloušťky podél celého povrch vzorku (je získána mapa lokální tloušťky vzorku) [13], [14].

4.2. „SINGLE-PIXEL“ METODA ZOBRAZOVACÍ SPEK-TROSKOPICKÉ REFLEKTOMETRIE JAKO METODA SAMOSTATNÁ

V případech, kdy je struktura spektrálních závislostí optických konstant studovaných tenkých vrstev relativně jednoduchá (v zajímavém spektrálním rozsahu) lze ISR použít k charakterizaci studovaných vrstev jako metodu samostatnou. Data jsou opět zpracována regresní metodou, ale jak bylo zmíněno, charakter spektrálních závislostí optických konstant umožní provést vyhodnocení pouze na základě lokální relativní odrazivosti vzorku tj. na základě dat ISR. Výsledkem je určení spektrálních závislostí optických konstant studovaného vzorku a mapa lokální tloušťky podél plochy vzorku [15]–[17].

4.3. „MULTI-PIXEL“ METODA ZOBRAZOVACÍ SPEK-TROSKOPICKÉ REFLEKTOMETRIE JAKO METODA SAMOSTATNÁ

Data z jednoho pixelu měřicí kamery ISR lze zpracovávat stejně jako data získaná konvenční technikou SR (kde se však vyhodnocují data „zprůměrovaná“ z celé ozářené plochy vzorku). Při regresní analýze těchto dat často musíme hledat velký počet parametrů. Tyto parametry jsou zpravidla korelovány, což znemožňuje jejich jednoznačné určení. V

takovém případě efektivita konvenčních metod vyhodnocování experimentálních dat může být zvýšena, připraví-li se vzorky, které se liší pouze v jednom optickém parametru, ale mají stejné parametry ostatní. Vyhodnocuje-li se taková sada vzorků současně, je možné odstranit, nebo alespoň potlačit korelace mezi hledanými parametry. Tento přístup se označuje jako „multi-sample“ metoda (tj. metoda s více vzorky). Je-li vzorek studovaný pomocí ISR neuniformní v tloušťce, lze si jednoduše představit, že data z jednotlivých pixelů jsou vlastně data sady vzorků lišících se právě v jednom parametru. Přístup „multi-sample“ metody lze tedy aplikovat přímo na soubor experimentálních dat získaných z jednoho vzorku měřením technikou ISR. Data z celé plochy studovaného vzorku jsou pak zpracovávána současně stejně jako u „multi-sample“ přístupu v případě konvenčních metod. Potlačení korelace a celé zpřesnění metody může pak být na takové úrovni, že lze pouze s pomocí ISR určit všechny hledané parametry. V takových případech je charakterizace vzorků pomocí ISR metodou samostatnou, po vzoru „multi-sample“ nazývanou jako „multi-pixel“ metoda [18]–[20].

4.4. „MULTI-PIXEL“ METODA ZOBRAZOVACÍ SPEKTROSKOPICKÉ REFLEKTOMETRIE V KOMBINACI S KONVENČNÍMI METODAMI

Pokud studovaná vrstva vykazuje vysokou míru neuniformity, obzvláště vykazuje-li i jiné vady než neuniformity v optických parametrech (např. drsnost rozhraní), roste obtížnost vyhodnocení dat z měření pomocí techniky ISR i konvenčních metod (počet hledaných parametrů v regresní analýze je vysoký). Aby bylo možné získat mapu lokální tloušťky této vrstvy, hodnoty optických parametrů a eventuálně také informace o drsnosti, bylo by potřeba do metody „multi-pixel“ zakomponovat také data z konvenčních technik (VASE, SR). Na rozdíl od přístupu popsaném v podkapitole 4.1, kdy byla data ISR z jednotlivých pixelů zpracována až po nalezení optických konstant konvenčními metodami, by nyní byla všechna data (získaná ISR i konvenčními technikami) ekvivalentní a byla by zpracovávána současně. Tento přístup teoreticky představuje velmi silný nástroj vyhodnocení, ale jeho implementace je nejkomplikovanější a zatím nebyla provedena.

4.5. SEKVENCE METOD ZOBRAZOVACÍ SPEKTROSKOPICKÉ REFLEKTOMETRIE

V některých případech, obzvláště u složitějších vzorků, lze využít sekvenci výše uvedených metod ISR. Například u vzorků připravených technologií plasma jet (popsáno [21]–[24]) bylo postupováno právě v následující sekvenci – data byla nejdříve zpracována s tabulkovými hodnotami optických konstant pro daný materiál (získaných z literatury) samostatnou „single-pixel“ metodou, data z vybraných pixelů pak byla zpracována samostatnou „multi-pixel“ metodou a následně znovu všechna data pomocí „single-pixel“ metody.

První fitování „single-pixel“ metodou sloužilo k eliminaci vadných pixelů tak, aby následně bylo možné vybrat deset nezávadných pixelů, z jejichž dat se „multi-pixel“ metodou

určí přesně optické konstanty vrstvy. Takto získané optické konstanty pak bylo možné použít pro fitování lokální tloušťky celého vzorku výpočetně méně náročnou „single-pixel“ metodou.

Tak bylo možné získat jak hodnoty optických konstant s vysokou přesností, tak průběh lokální tloušťky vzorku pouze využitím dat ISR.

Srovnání s profilometrickými metodami potvrdilo správnost určených parametrů [25].

4.6. DALŠÍ APLIKACE

Naměřená data technikou ISR lze využít kromě určení optických parametrů vrstev i dalšími způsoby. Výstupem měření je totiž obrazový záznam povrchu s mapou spektrálních závislostí lokální odrazivosti studovaného vzorku. Data lze využít všude tam, kde je zajímavá informace o plošné mapě lokální odrazivosti vzorků. Může se např. jednat o vzájemné rozlišení různých materiálů, kontrola uniformity povrchu z optického hlediska atd.

5. VÝVOJ ZOBRAZOVACÍHO SPEKTROSKOPICKÉHO REFLEKTOMETRU NA ÚSTAVU FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

První laboratorní sestava pro měření technikou ISR využívala jako světelný zdroj laditelný Ar–Kr laser Innova Spectrum 70 firmy Coherent. Laserový svazek měl výhodu ve vysoké monochromatickosti výstupních svazků v nastavitelných vlnových délkách. Nízká divergence těchto svazků umožňovala jednoduše vytvořit široký rovnoběžný světelný svazek a zdroj poskytoval dostatečnou intenzitu. Zásadní nevýhodou byl omezený počet nastavitelných vlnových délek a koherenční zrnitost (kterou bylo nutné eliminovat rotující matnicí na výstupu laseru). Sestava tedy sloužila k ověření principů ISR, při aplikaci k charakterizaci tenkých vrstev byla kombinována s dalšími technikami.

Aby bylo možné technikou ISR získat více dat, bylo nutno měřit ve větším rozsahu vlnových délek a tak skutečně proměřit spektrální závislost lokální relativní odrazivosti vzorku. Laditelný laser byl tedy nahrazen hranolovým monochromátorem SPM2 (Carl Zeiss Jena) s halogenovou výbojkou. Rozsah sestavy byl dán propustností hranolu monochromátoru v rozmezí 450 nm až 700 nm, kdy vlnovou délku bylo možné volit s velkou přesností s libovolným krokem. Sestava tedy umožňovala proměřit spektrální závislost lokální relativní odrazivosti vzorku ve výše uvedeném rozsahu.

Zmíněný monochromátor poskytoval vysoce kvalitní monochromatické světlo v rámci svého spektrálního rozsahu, použití optického hranolu ale znamenalo významné omezení z hlediska použitelných vlnových délek.

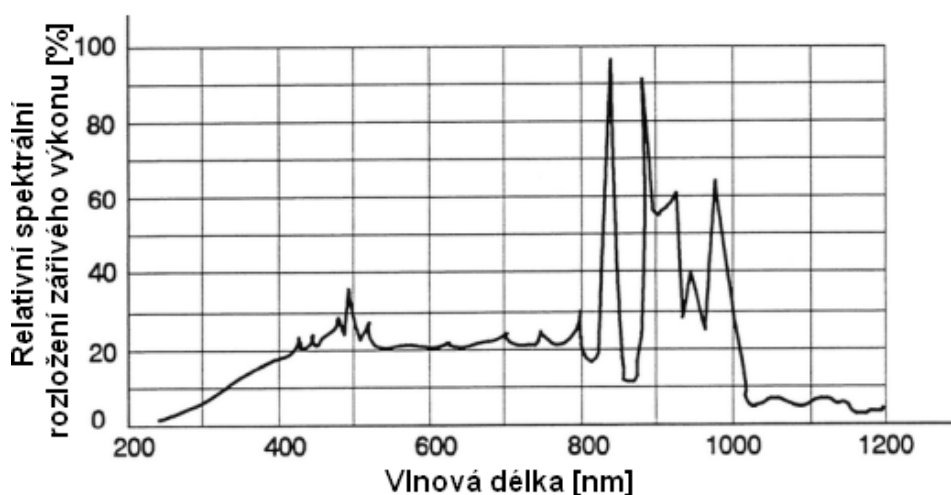
Výše uvedené systémy měly zobrazovací část řešenou pouze jediným děličem světelného svazku a objektivem kamery. Zobrazovací soustava tedy rovněž omezovala rozsah použitelných vlnových délek. Přestože se jednalo primárně o sestavy testující možnosti techniky ISR, byly úspěšně použity k nalezení optických parametrů několika typů tenkých vrstev.

6. ZOBRAZOVACÍ SPEKTROSKOPICKÝ REFLEKTOMETR S ROZŠÍŘENÝM SPEKTRÁLNÍM ROZSAHEM

V předchozí kapitole zmiňovaná zařízení vznikla pouze jako laboratorní sestavy. Na základě zkušeností získaných při jejich návrhu byl na ÚFI navržen [26] automatizovaný zobrazovací spektroskopický reflektometr s rozšířeným spektrálním rozsahem (ISRWS, z anglického imaging spectroscopic reflectometer with wide spectral range). Některá jeho zlepšení byla publikována v [27], [28].

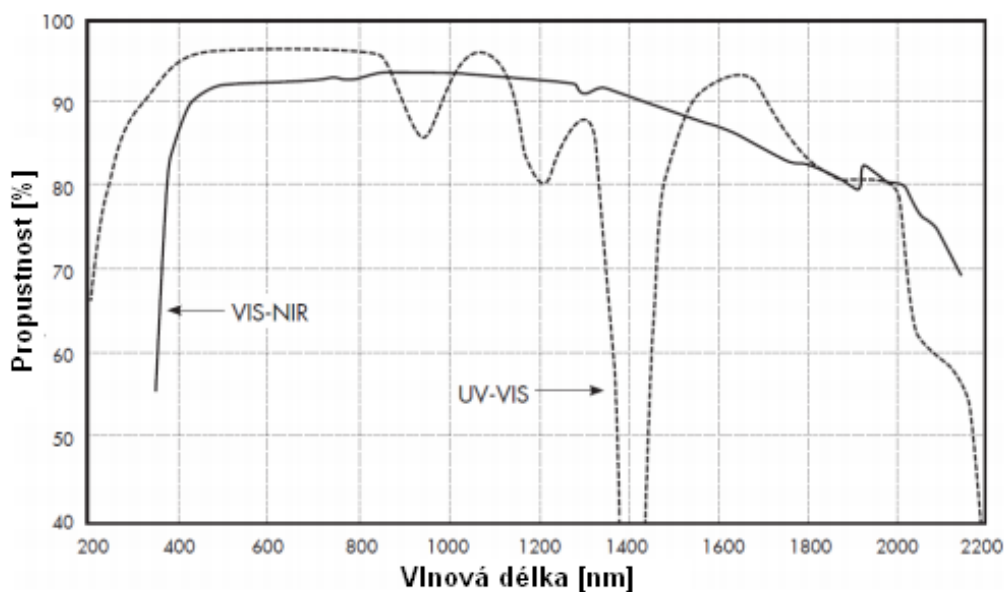
6.1. ZDROJ ŠIROKOSPEKTRÁLNÍHO SVĚTLA

Intenzita monochromatického světelného svazku, který osvětluje studovaný vzorek, závisí v první řadě na použitém zdroji širokospektrálního světla pro monochromátor. V ISRWS použitý monochromátor Jobin Yvon Triax 320 byl dodán s vlastní širokospektrální 75 W Xe výbojkou. Dodaná výbojka se ale ukázala výkonově nedostačující a také její spektrální rozložení výkonu bylo nevyhovující s výraznými maximy v blízké IR části spektra. Spektrální rozložení zářivého výkonu výbojky je znázorněno na obrázku 6.1.1.



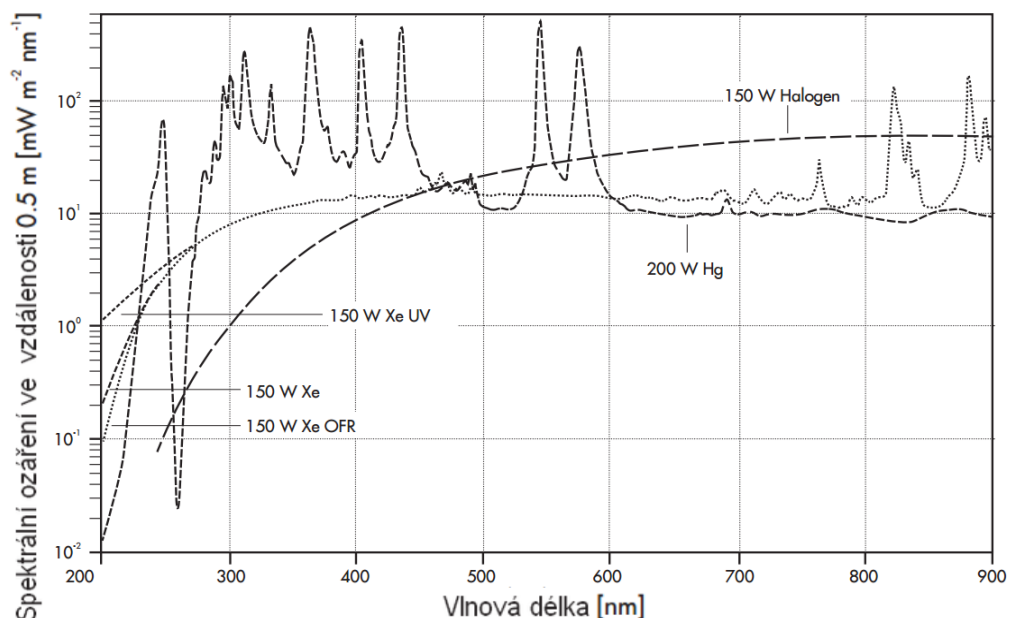
Obr. 6.1.1: Relativní spektrální rozložení zářivého výkonu 75 W Xe lampy dodané s monochromátorem.

Omezení výkonu výbojky bylo dáno prostorovými parametry jejího upevnění na monochromátor. Nebylo proto možné zakoupit novou, výkonnější výbojku, kterou by bylo možné přímo upevnit na vstup monochromátoru. Nově zvolená 150 W Xe výbojka navržená s větším dosahem do UV části spektra byla proto ke vstupu monochromátoru připojena pomocí kabelu optických vláken. Výrobce výbojky byla firma LOT-Oriel (dnes LOT-QuantumDesign), použitý kabel optických vláken stejného výrobce byl vybrán tak, aby nelimitoval požadovaný spektrální rozsah až do spodní hranice 200 nm. Propustnost pro 2 m kabelu je znázorněna na obrázku 6.1.2.



Obr. 6.1.2: Propustnost pro 2 m kabelu optických vláken LOT–Quantumdesign. Použitý kabel je označen „UV–VIS“ [37].

Širokospektrální světelný svazek výbojky je navazován do kabelu optických vláken pomocí čočky z křemenného skla, do systému byl také zakomponován měnič optických hranových filtrů potřebný k eliminaci vyšších řádů difrakce mřížek monochromátoru. Výstup kabelu optických vláken byl umístěn přímo na vstupní štěrbinu monochromátoru. I přes ztráty způsobené navazováním světla do kabelu optických vláken byl výstupní světelný výkon výrazně vyšší, než výkon původní slabší výbojky. Nová lampa vykazuje také lepší spektrální rozložení světelného výkonu (obrázek 6.1.3).



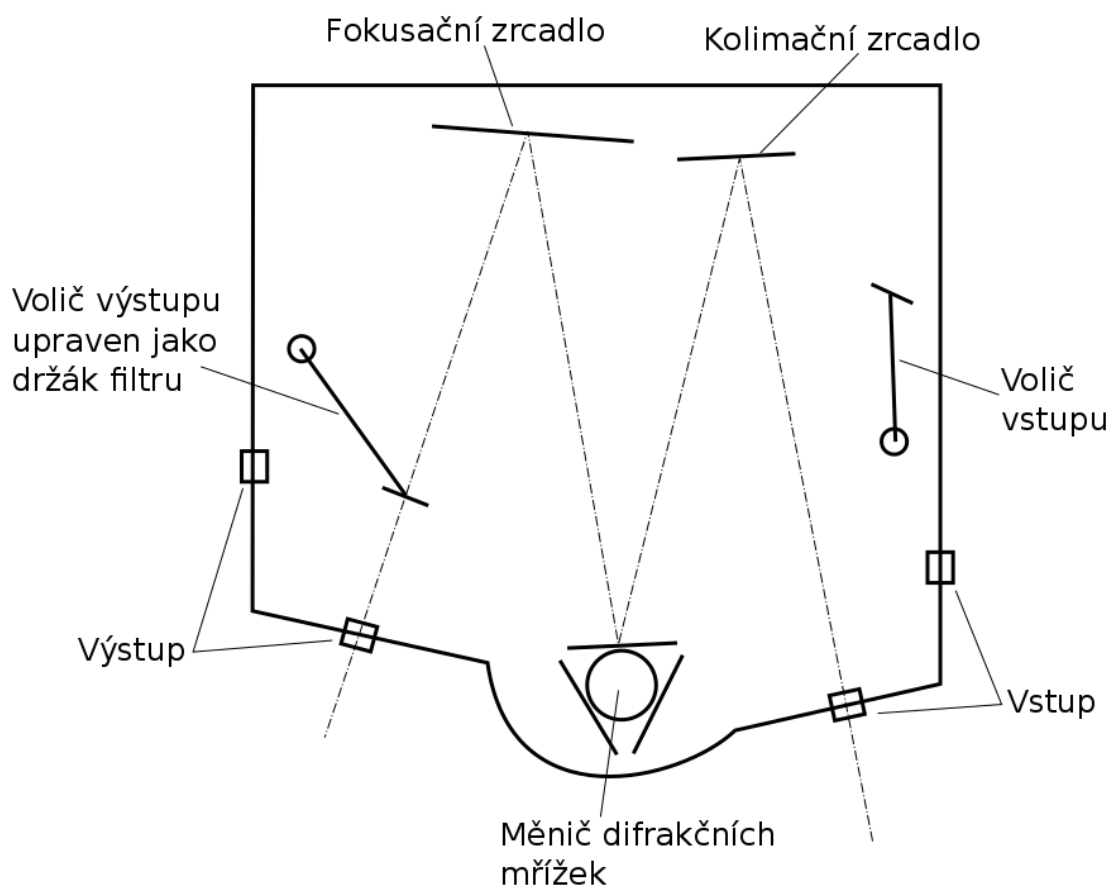
Obr. 6.1.3: Spektrální závislost zářivého výkonu použité xenonové lampy (150 W Xe UV – jemně tečkovanou čarou) [37].

6.2. MONOCHROMÁTOR JOBIN YVON TRIAX 320

ISRWS využívá počítačem ovládaný mřížkový monochromátor Jobin–Yvon Triax 320 v konfiguraci Czerny–Turner (schéma znázorněno na obrázku 6.2.1). Ohnisková vzdálenost monochromátoru je 320 mm, zvětšení je rovno 1, vstupní štěrbina je zobrazena na výstupní. Přístroj je vybaven dvěma vstupy a dvěma výstupy, vstup a výstup se volí pomocí přidavných zrcadel na otočných ramínkách. Držák mřížek má tři polohy, k dispozici mohou být tedy až tři různé difrakční mřížky. Použitou mřížkou je mřížka se 1200 vrypů na mm, blejzovaná pro 250 nm (má asymetrické rýhování, které způsobuje posílení zvoleného difrakčního směru). S touto mřížkou má přístroj spektrální rozsah 200 nm–2000 nm). Posílení UV oblasti je voleno z důvodu horší propustnosti materiálů optických prvků v této spektrální oblasti.

Štěrbiny přístroje jsou nastavitelné, lze tedy volit mezi intenzitou a úrovní monochromatickosti výstupního svazku.

Monochromátor v ISRWS využívá pouze jediný vstup a jediný výstup, nastavitelné ramínko bylo použito jako držák dodatečného filtru (popsáno později v oddíle 6.7.1). Dodávaný měnič filtrů (sloužící k eliminaci překryvu vyšších řádů difrakce) je totiž umístěn velmi blízko světelného zdroje, filtry jsou proto vystaveny intenzivnímu širokospektrálnímu světlu, filtr zmíněný v oddíle 6.7.1 by nemusel tyto podmínky vydržet.



Obr. 6.2.1: Půdorys použitého monochromátoru Jobin–Yvon Triax 320 .

6.3. KABEL OPTICKÝCH VLÁKEN

V první verzi přístroje ISRM byl monochromátor a zobrazovací část přístroje propojena pouze ustavením přístrojů (viz oddíl 3.7.1), které byly fixovány na optickém stole. Kromě rizik popsaných v uvedeném odstavci byl problematický kolimátor, který byl umístěn přímo na výstupu monochromátoru. Nevytvářel totiž světelný svazek vhodných parametrů (svazek měl malý průřez a vysokou neuniformitu intenzity v průřezu). K vytvoření svazku s lepší uniformitou bylo proto navrženo využití optického kabelu s propletenými vlákny. Zvolený kabel měl na jenom konci vlákna uspořádána do tvaru štěrbin a na druhém do tvaru kruhové apertury. Navázáním světla z monochromátoru do štěrbin tak došlo k promíchání světla v kabelu a na druhém konci kabel poskytoval symetrický divergentní svazek s uniformě rozloženou intenzitou v jeho průřezu. Tento svazek byl dále kolimován a používán k zobrazení studovaného vzorku.

Protože vstupní štěrbina kabelu byla příliš úzká, umístění vstupu kabelu přímo na výstup monochromátoru by znamenalo velkou ztrátu intenzity (na druhou stranu vysokou monochromatickostí světelného svazku), navázání bylo proto řešeno pomocí dvou válcových zrcadel navržených tak, aby se do kabelu optických vláken navázalo co nejvíce světla [27].

Uniformita světelného svazku skutečně vzrostla, nevýhodou ale byla skutečnost, že navázání světla do kabelu optických vláken bylo stále velmi ztrátové. Tím se velmi prodloužily expoziční doby měření.

Proto bylo k propojení monochromátoru a zobrazovací části přístroje použito stejného kabelu optických vláken jako pro propojení lampy a monochromátoru. Protože se jedná o kabel optických vláken stejných parametrů, jeho přijímací úhel je stejný. Při zvětšení monochromátoru 1 tak nyní při navázání světla do kabelu optických vláken již téměř ke ztrátám nedochází.

Mírně horší uniformita v intenzitě výsledného světelného svazku v přístroji je eliminována tím, že měření je relativní a je zajištěno precizní nastavení polohy studovaného a referenčního vzorku.

Zvýšení intenzity svazku bylo významné, kromě zkrácení expozičních časů až o 60% bylo také možné měřit v o něco širším rozsahu vlnových délek elektromagnetického záření, obzvláště směrem do UV oblasti.

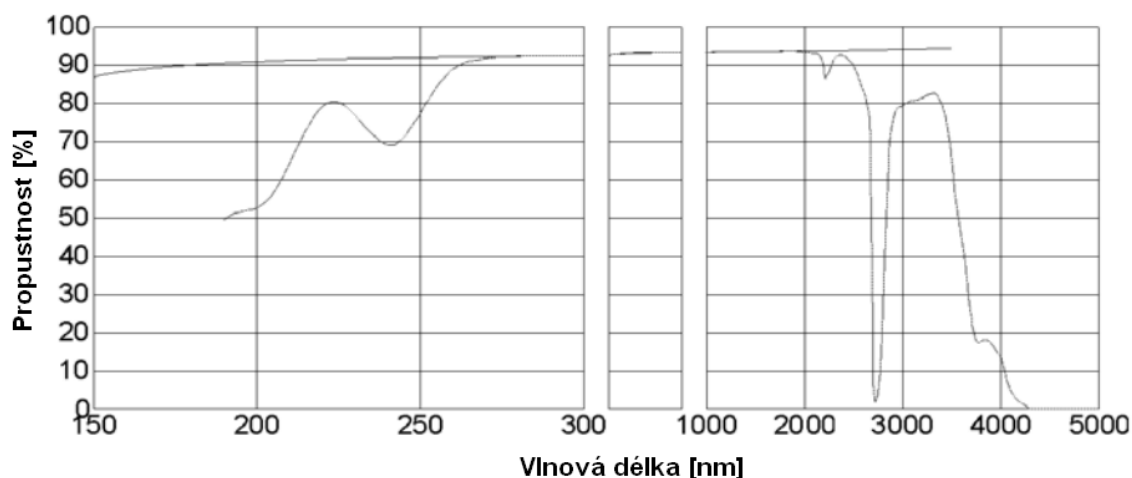
6.4. KOLIMÁTOR

S monochromátorem byl dodán přídatný modul s kolimátorem, který měl sloužit jako zdroj širokého kolimovaného světelného svazku pro přístroj ISRWS. Kolimátor byl řešen pomocí kombinace sférického a rovinného zrcadla. Jeho kvalita se ale ukázala nedostatečná, neboť vyžadoval přesné ustavení monochromátoru a skříně přístroje vedle sebe. To se ukázalo jako nevhodné řešení. Problém byl ve vytvoření světlotěsného propojení obou zařízení. Kolimátor také nevytvářel světelný svazek dostatečného průřezu.

Výměna kolimátoru za nový byla kombinována s novým propojením monochromátoru a kolimátoru pomocí kabelu optických vláken. Výstupní štěrbina kabelu optických vláken byla použita jako bodový světelný zdroj kolimátoru. Kolimátor byl realizován použitím mimoosového parabolického zrcadla, jak popisuje oddíl 3.3.2. Bylo použito mimoosové parabolické zrcadlo s úhlem vyosení 90° a ohniskovou vzdáleností 152,4 mm (6"). Kolimátor byl nově navržen na základě zkušeností s návrhem kolimátoru pro nový doplňkový ISRM (bude popsán později v kapitole 7).

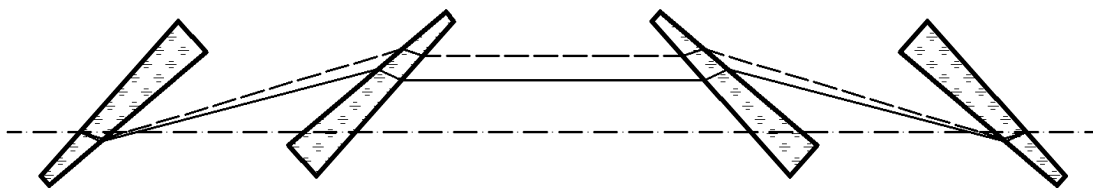
6.5. DĚLIČ

Problém dělení světelného svazku je v ISRWS vyřešen pomocí klínového tvaru děliče z materiálu homosil (propustnost materiálu pro tloušťku 10 mm je znázorněna na obrázku 6.5.1). Klínový tvar děliče umožňuje směřovat nechtěný sekundární odraz svazku na nefunkční ploše cíleně mimo chod primárního svazku. Nevýhodou tohoto řešení je změna směru chodu primárního svazku. Ta je kompenzována druhým homosilovým klínem o stejné klínovitosti, který opět světelný svazek přesměruje rovnoběžně s jeho původním směrem. Tato kombinace ale neřeší problém s posuvem svazku vlivem disperze světla (z klínového děliče vystupuje světlo různým směrem vlivem různého indexu lomu pro různé vlnové délky světla). Tento posuv vlivem disperze světla je nutné kompenzovat dalšími dvěma klíny ze stejného materiálu umístěnými zrcadlově k prvním dvěma.



Obr. 6.5.1: Typická spektrální propustnost materiálu homosil pro tloušťku 10 mm [38].

Na obrázku 6.6.1 je znázorněna sestava čtyř optických klínů umístěných tak, aby si světelný svazek zachoval původní směr nezávisle na jeho vlnové délce.



Obr. 6.6.1: Sestava 4 klínů z materiálu homosil. Čerchovanou čarou je označen původní směr svazku. Plnou a přerušovanou čarou jsou znázorněny svazky procházející sestavou, každý o jiné vlnové délce (vliv disperze světla v materiálu)

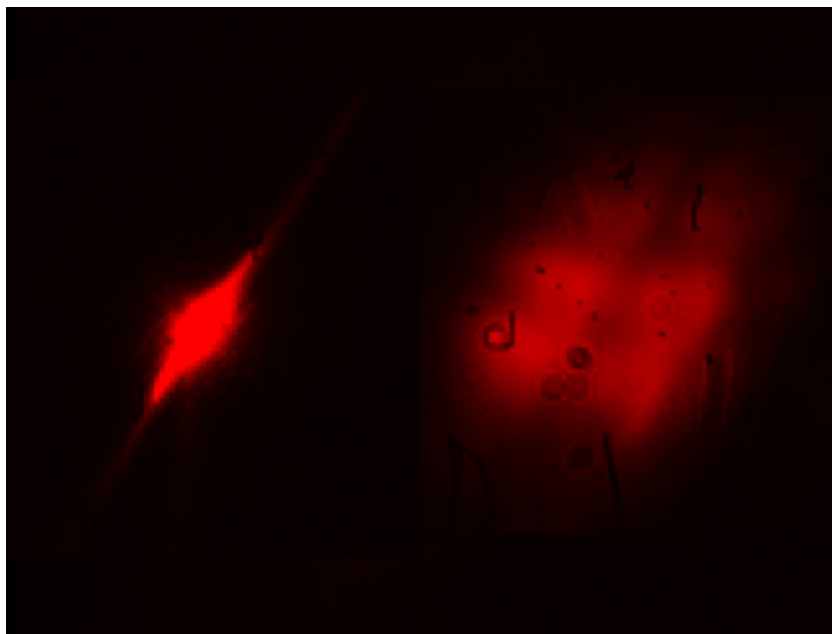
6.6. NASTAVENÍ VZORKU

V původním návrhu ISRWR byly vzorky upevněny svisle v držáku, který bylo možné úhlově nastavovat. Stejná poloha studovaného a referenčního vzorku byla zajišťována sledováním polohy stopy pomocného laserového svazku odraženého od vzorku. Aby bylo měření urychleno, byl studovaný a referenční vzorek umístěn každý do oddělených držáků, které bylo možné na kolejnici mezi sebou vyměňovat.

Při měření však docházelo ke vzniku defektů ve formě pruhů odlišných relativních odrazivostí v měřených datech i pro velmi uniformní vzorky. Pruhy byly způsobeny kombinací dvou faktorů, a to rozdílného ustavení studovaného a referenčního vzorku a ne úplně uniformního rozložení intenzity v průřezu osvětlovacího svazku.

Nevýhodou tohoto způsobu nastavování vzorku byla jeho náročnost způsobená obzvláště velkou potřebnou vzdáleností stínítka, na kterém byly změny nastavení vzorku sledovány. Pro změny nastavení rozlišitelné okem muselo být stínítko umístěno mimo skříň přístroje, celý systém tak byl velmi náchylný na otřesy. Řešením bylo nahrazení stínítka čipem CCD kamery přímo do skříně přístroje. Rozlišení CCD čipu je závislé na velikosti jednotlivých pixelů a je tedy výrazně vyšší než při vizuálním pozorování laserové stopy na stínítku. Velkou výhodou pak byla možnost zobrazit hledanou polohu laserové stopy ve videozáznamu pořizovaném pomocnou zaměřovací kamerou a bylo tedy možné přesně nastavit polohu nově nastavovaného vzorku.

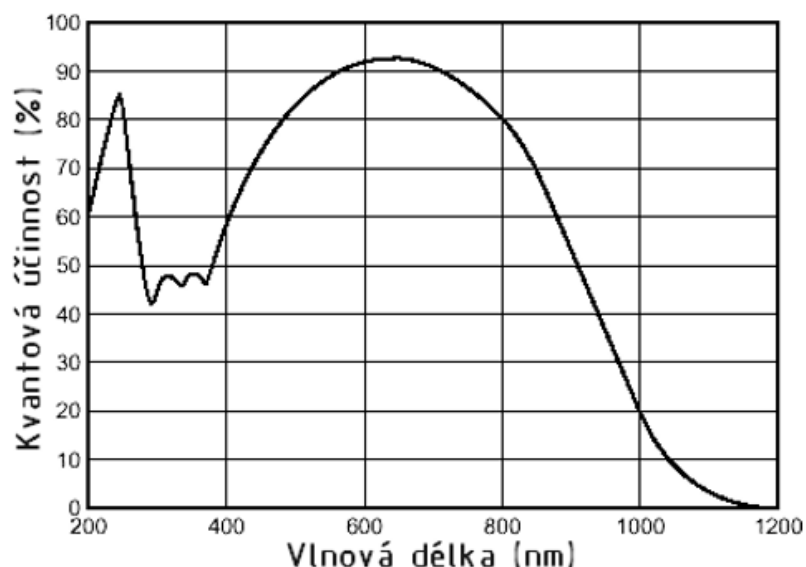
Nevýhodou byla nemožnost použití systému pro všechny vzorky. Více rozptylující vzorky výrazně rozšiřovaly světelnou stopu laserového paprsku a překrytím stop nebylo možné dosáhnout stejně velké přesnosti jejich nastavení jako u vzorků se zrcadlovým odrazem. Srovnání stop, které není možné dokonale překrýt (referenční vzorek zpravidla nerozptyluje), je zobrazeno na obrázku 6.6.2.



Obr. 6.6.2: Srovnání zaměřovacího bodu pro vzorek se zrcadlovým odrazem (vlevo) a pro mírně rozptylující vzorek (vpravo)

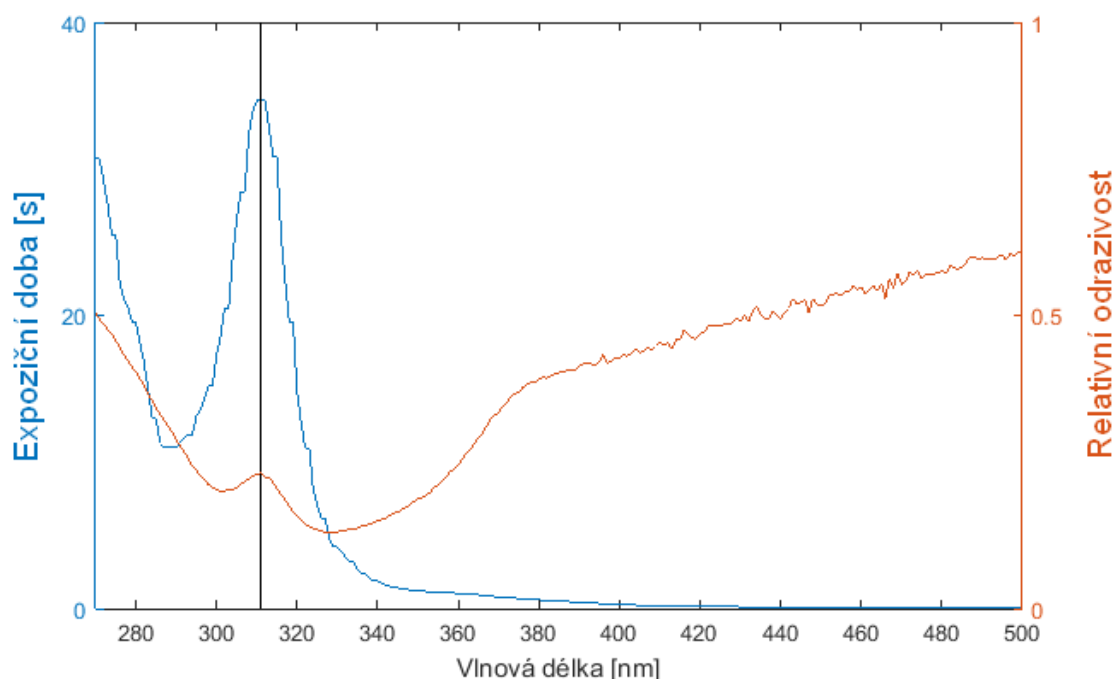
6.7. MĚŘICÍ KAMERA

Důležitou součástí ISRM je měřicí kamera. ISRWS, který je navržený pro práci v širokém spektrálním oboru elektromagnetického záření, využívá kameru ORCA II–BT–512G. Rozlišení kamery je 512 x 512 pixelů o velikosti 24 x 24 μm^2 . Hlavními přednostmi kamery je její čip Hamamatsu S7170 a chladič jednotka kamery, která dokáže hermeticky uzavřený čip ochladit na teplotu -55°C . Čip Hamamatsu S7170 použitý v kameře je navržen pro velký rozsah detekovaných vlnových délek (kvantová účinnost čipu je znázorněna na obrázku 6.7.1), má vysoký dynamický rozsah a nemá ochranu proti přetečení, při saturaci jednoho pixelu tedy dojde k ovlivnění okolních pixelů. Jeho poslední vlastnost zaručuje lepší lineární odezvu čipu.



Obr. 6.7.1: Typická kvantová účinnost kamery Hamamatsu ORCA II BT-512G [39].

Vysoká míra chlazení čipu způsobuje, že detektor má velmi nízký temný proud (dle výrobce 0,8 elektron/pixel/s). Je tedy možné měřit i s relativně vysokými expozičními časy, což je velmi výhodné v komplikované oblasti světelného spektra v okolí 310 nm, kde se skládají nepříznivé faktory – nižší kvantová účinnost kamery a zároveň menší světelný výkon lampy v této oblasti. Kombinace těchto faktorů měla za následek negativní ovlivnění měření. Vada se prokázala u specifického typu vzorků, které měly v oblasti okolo 311 nm minimum v odrazivosti, ale v jiných oblastech spektra vykazovaly relativně vysokou odrazivost. U těchto vzorků docházelo k deformaci minima měřené spektrální závislosti relativní odrazivosti. U vzorku, který byl navržen speciálně pro řešení tohoto problému a měl široké minimum odrazivosti v rozmezí 280 nm–380 nm, byl naměřeno úzké lokální maximum odrazivosti právě s vrcholem v 311 nm. Toto maximum se nacházelo přesně ve vlnové délce, při které bylo nutné nastavit nejdelší expoziční čas kamery. Přesná shoda vrcholů obou závislostí (viz obrázek 6.7.2) byla způsobena rozptylem světla na difrakční mřížce monochromátoru.



Obr. 6.7.2: Srovnání změřené spektrální závislosti relativní odrazivosti (červeně) pro plošku na vzorku Si_3N_4 odpovídající jednomu pixelu kamery vykazující propad odrazivosti v rozmezí 280 nm až 380 nm s neočekávaným nárůstem v blízkosti 311 nm (vyznačeno svislou čarou) a expoziční dobou záznamu kamery (modře)

6.7.1. Detekce světla rozptýleného difrakční mřížkou

Nedokonalosti při výrobě difrakční mřížky způsobují, že se část bílého světla, které na mřížku dopadá, rozptýlí do všech směrů. Část tohoto rozptýleného světla vstupuje do kabelu optických vláken, a tedy dál do přístroje ISRM. Intenzita difrakční mřížkou rozptýleného světla je velmi malá, ale obzvláště u fotometrických měření může mít velmi významný vliv. Často se proto používají u fotometrických přístrojů dvoumřížkové monochromátory, které zmiňovaný nežádoucí rozptyl výrazně minimalizují [29], [30].

Při snaze zjistit příčinu vzniku výše zmíněného lokálního maxima ve spektrální závislosti relativní odrazivosti měřeného vzorku byl výstup monochromátoru proměřen přenosným spektrometrem a kromě světla o zvolené vlnové délce 311 nm nebyly zaznamenány žádné jiné parazitní vlnové délky. Problematickou skutečností bylo, že světlo rozptýlené difrakční mřížkou mělo charakter bílého světla s velmi uniformním rozdělení intenzity. V méně citlivém přenosném spektrometru bylo proto skryto do celkového šumu. Značný vliv na měřenou odrazivost lze zdůvodnit na základě následující úvahy.

Zanedbáme-li v (3.8.2) pozadí, lze vidět, že na signál vyčtený z (k,u) -tého pixelu má vliv intenzita zdrojového svazku I_0 , odrazivost studovaného vzorku a přístrojové funkce η , které se obecně liší pro různé vlnové délky λ_n :

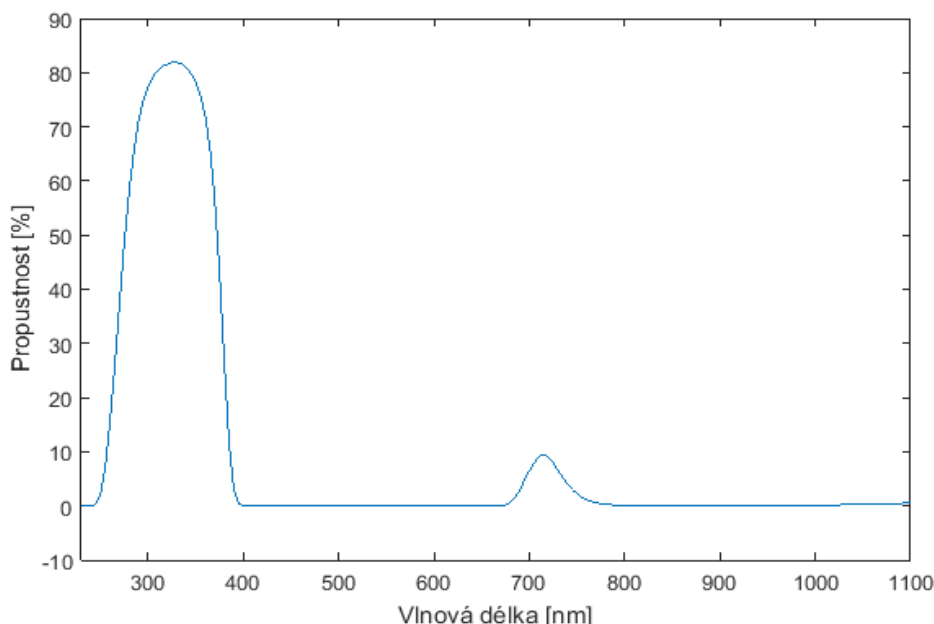
$$S_{MI}^{k,u}(\lambda_n, t_1) = I_o(\lambda_n, t_1) \eta^{k,u}(\lambda_n) R_1^{k,u}(\lambda_n). \quad (6.7.1)$$

Pokud ale nastane situace, že ve zdrojovém svazku bude světlo více vlnových délek, měřený signál pro zvolenou vlnovou délku λ_n bude ovlivněn také tímto světlem ostatních vlnových délek v závislosti na jejich intenzitách, odezvách celé optické soustavy na toto světlo a lokální odrazivosti měřeného vzorku. Čip CCD kamery reaguje na veškeré na něj dopadající elektromagnetické záření podle jeho kvantové účinnosti, bez možnosti selekce vybrané vlnové délky. Signál pro zvolenou vlnovou délku λ_n bude vypadat následovně:

$$S_{MI}^{k,u}(\lambda_n, t_i) = I_o(\lambda_n, t_1) \eta^{k,u}(\lambda_n) R_1^{k,u}(\lambda_n) + \int_{min} I_o(\lambda, t_1) \eta^{k,u}(\lambda) R_1^{k,u}(\lambda) d\lambda. \quad (6.7.2)$$

Meze integrálu *min* a *max* definují rozpětí vlnových délek, které jsou ve spektru osvětlovacího svazku obsaženy, ale jsou nežádoucí. Světlo rozptýlené difrakční mřížkou je obecně polychromatické, širší rozpětí integrálu v (6.7.2) je proto velmi významná. Malá odrazivost vzorku pro zvolenou vlnovou délku, ale jeho výrazně vyšší odrazivost pro jiné vlnové délky spolu s kvantovou účinností kamery a velkým spektrální rozsahem nežádoucího záření způsobilo, že integrál ve vztahu (6.7.2) nabyl větších hodnot než samotná odezva kamery na primární světelný svazek o vlnové délce 311 nm.

Řešení problému tedy znamenalo odstranit ze zdrojového svazku záření nevhodných vlnových délek. To bylo zajištěno využitím pásmového filtru FGUV11 (fy. Thorlabs, Inc.) s rozsahem 250 nm–400 nm, jehož propustnost je znázorněna na obrázku 6.7.3. Filtr eliminuje ze zdrojového svazku při měření v blízké UV oblasti záření ostatních vlnových délek, obzvláště vlnových délek, které lampa vyzařuje s vyšší intenzitou a kamera má pro ně vyšší kvantovou účinnost.



Obr. 6.7.3: Propustnost pásmového filtru FGUV11 sloužícího k odstranění parazitního záření v monochromátoru [40].

Při měření spektrální závislosti odrazivosti pro vyšší vlnové délky se filtr nepoužívá. Úroveň intenzity záření volených vlnových délek je totiž dostatečně vysoká, aby nebyl naměřený signál nezanedbatelně ovlivněn rozptýleným zářením z difrakční mřížky.

6.8. REFERENČNÍ KANÁL

ISRWS byl navržen jako dvoukanálový reflektometr. Referenční kanál slouží ke kompenzaci časových fluktuací ve výkonu zdroje záření. Aby referenční kanál fungoval správně, je potřeba, aby signál zaznamenaný referenčním kanálem byl lineárně závislý na intenzitě zdrojového svazku a aby byl nezávislý na právě měřeném vzorku (signál musí být možné popsat vztahem (3.8.5)).

Konstrukční řešení ISRWS používající děliče světelného svazku je ideální k implementaci referenčního kanálu. Kolimovaný světelný svazek je směřován na studovaný vzorek pomocí děliče světelného svazku. Jak bylo ukázáno, nejlepší efektivitu dosahuje dělič s dělicím poměrem 50/50. Velká část světelného svazku tedy děličem projde a není již dál využita k osvětlení studovaného vzorku. Tuto část zdrojového svazku je možné jednoduše použít k měření intenzity zdrojového svazku v referenčním kanálu.

6.8.1. Referenční kanál s fotodiodou

První verze referenčního kanálu byla navržena s využitím fotodiody jako detektoru. Implementace této verze do sestavy ISRWS se ukázala příliš náročná. Široké světelné spektrum, ve kterém ISRWS pracuje, výrazně komplikuje použití fotodiody. Fotodioda totiž musí být doplněna ovládací elektronikou a software, které kompenzují rozdíly ve spektrálních závislostech kvantové účinnosti fotodiody a kvantové účinnosti CCD kamery. Jak bylo popsáno dříve, eliminace časových fluktuací intenzity zdrojového svazku je matematicky provedena pomocí podílů signálů na výstupu detektorů v měřicí a referenční větvi ISRWS. Hodnoty zaznamenaných signálů by měly být obdobného řádu, aby nedošlo k šíření chyb při výpočtu relativní odrazivosti studovaného vzorku.

Nedostatkem fotodiod je závislost jejich výstupního signálu na teplotě. Z tohoto pohledu jsou obzvláště širokospektrální fotodiody s detekčním rozsahem vhodným pro ISRWS (250 nm až 1100 nm) velmi problematické. S ohledem na časový rozdíl mezi měřením studovaného a referenčního vzorku by použití fotodiody znamenalo nutnost sledování teploty ve skříni přístroje za účelem kompenzace teplotní závislosti jejího signálu.

V důsledku toho byl záměr použití fotodiody v referenčním kanálu opuštěn pro celkovou náročnost realizace.

Výhodou konvenčních SR je, že v referenčním kanálu využívají buď přímo samotný měřicí detektor, nebo jeho identický typ. Využití stejného detektoru k měření odrazivosti i k odečítání referenčního kanálu nás vedlo k vytvoření jiného uspořádání referenčního kanálu v ISRWS.

6.8.2. Referenční kanál s využitím sekundárního referenčního vzorku

Komplikace s aplikací fotodiody v referenčním kanálu ISRWS je možné odstranit přímo využitím části čipu měřicí CCD kamery jako detektoru v tomto kanálu. Základem pro to je přivedení nevyužitých částí zdrojového svazku (která děličem přímo projde) na vybranou část měřicího CCD čipu tak, aby nebyla jeho intenzita ovlivněna aktuálně měřeným vzorkem. Dělič světelného svazku pro optickou sestavu vytvoří dvě ekvivalentní předmětové roviny. Do té předmětové roviny, která je nevyužitá pro studovaný nebo referenční vzorek, se umístí další sekundární referenční vzorek určený pro referenční kanál. Tento vzorek nemusí být ze stejného materiálu jako referenční vzorek z měřicího kanálu. Obecně je to ale nejvhodnější varianta. Expoziční časy měření jsou nastavovány pro referenční vzorek z měřicího kanálu, hodnoty signálu referenčního kanálu tak při použití sekundárního referenčního vzorku ze stejného materiálu budou podobné. Sekundární referenční vzorek je umístěn tak, aby byl zobrazen na část CCD čipu vyhrazenou pro referenční kanál. Signál vybraného (l,v) -tého CCD pixelu referenčního kanálu lze zapsat obdobně jako signál z pixelů měřicí kamery využitých v měřicím kanálu:

$$S_{Ri}^{l,v}(\lambda, t_i) = I_o(\lambda, t_i) \eta^{l,v}(\lambda) R_R^{l,v}(\lambda) + b^{l,v} I_o(\lambda, t_i) + D^{l,v}(\lambda). \quad (6.8.1)$$

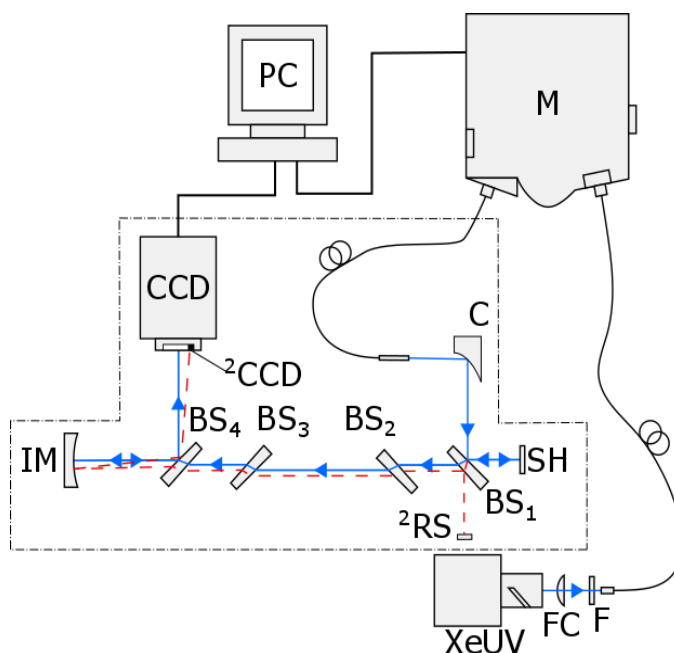
Podstatný fakt je, že R_R je stejné pro všechny indexy i , tj. pro všechny měřené vzorky i pro pozadí.

Vliv elektroniky kamery (tj. temný proud, bias atd.) D je nezávislý na intenzitě zdrojového světelného svazku a lze jej odstranit stejně jako v dříve popsáných případech. Část pozadí závislá na intenzitě svazku nemusí být odstraněna, protože kombinace signálu od sekundárního referenčního vzorku a pozadí způsobeného rozptylem světla je lineárně závislá na intenzitě svazku. Tuto část lze zahrnout do přístrojové funkce:

$$\eta_R^{l,v}(\lambda) = \eta^{l,v} R_R^{l,v}(\lambda) + b^{l,v}. \quad (6.8.2)$$

Tímto způsobem se výraz (6.8.1) převede na výraz (3.8.5) a lze tedy použít signály z (l,v) -tých pixelů CCD kamery jako výstupní signály referenčního kanálu. V přístroji ISRWS bylo upevnění sekundárního referenčního vzorku zajištěno svislým držáčkem vzorků. Protože je při měřeních prakticky trvale využit jediný sekundární referenční vzorek a není jej třeba při každém měření měnit, použití malého držáčku v referenčním kanálu bylo velmi vhodné. Protože je údaj z pixelů referenčního kanálu zajímavý pouze z hlediska záznamu okamžité intenzity zdrojového svazku, není nutné, aby byl obraz sekundárního referenčního vzorku na kameře zaostřený. Toho lze využít pro kompaktnější návrh referenčního kanálu.

Nové schéma přístroje ISRWS po všech úpravách je znázorněno na obrázku 6.8.1.



Obr. 6.8.1: Schéma ISRWS po úpravách; XeUV – xenonová lampa, FC – fokusační čočka, F – filtr, M – monochromátor, C – kolimátor, BS₁₋₄ – děliče a kompenzátor, IM – zobrazovací zrcadlo, CCD – měřicí kamera, ²CCD – vybraná část pixelů měřicí kamery sloužící jako druhý kanál, ²RS – referenční vzorek druhého kanálu, SH – studovaný nebo referenční vzorek, PC – počítač.

6.9. ŘIDICÍ SOFTWARE

Ovládání přístroje ISRWS je automatizováno pomocí stolního počítače. Pořizování stovek snímků vzorků odpovídajících nastaveným vlnovým délkám záření by bylo téměř nemožné provádět manuálně. Řidicí (modulární) software je koncipován jako souhrn několika jednotlivých programů. Tři základní programy (pro ovládání kamery, pro ovládání monochromátoru a program zpracovávající měřicí tabulky) jsou propojeny programem čtvrtým, který slouží ke koordinaci předchozích programů při samotném měření. Jednotlivé základní programy umožňují kompletní ovládání přiřazených přístrojů. Software kamery je možné použít k vytváření a ukládání snímků, software monochromátoru slouží k jeho nastavování. Software pro měřicí tabulky slouží pro zprávu a prohlížení měřicích tabulek. Generování tabulek zprostředkovává nadřazený software pro kontrolu automatických měření.

Modulární uspořádání jednotlivých programů umožňuje rozšířenou kompatibilitu software. Umožňuje totiž nahrazení jedné komponenty přístroje bez nutnosti kompletního přeprogramování celého software.

7. ZOBRAZOVACÍ SPEKTROSKOPICKÝ REFLEKTOMETR S VYŠŠÍM LATERÁLNÍM ROZLIŠENÍM

ISRWS se ukázal být velmi praktickým zařízením s širokým spektrem využití charakterizace tenkých vrstev neuniformních v jejich optických parametrech. Síla metody ISR se začala ukazovat zejména v případě možnosti charakterizace cíleně generovaných neuniformních vzorků, ne jen vzorků, jež byly výsledkem optimalizace technologií vytvářejících standardní optické tenké vrstvy.

Z tohoto hlediska bylo významné měření vzorků připravených technologie plasma jet. Technologie plasma jet umožňuje ovlivňovat plasmatem povrch vzorku na vybraných malých plochách a vytvářet tak velmi neuniformní vrstvy. Sada vzorků čistého křemíku s vrstvou SiO₂ vytvořenou neuniformně právě pomocí technologie plasma jet poukázala na silné stránky metody ISR, ale zároveň na omezení způsobená samotným přístrojem ISRWS. Neuniformity vytvořené technologií plasma jet nebylo možné účinně a obzvláště nedestruktivně měřit jinak, než metodou ISR. Přístroj ISRWS ale v případě některých vzorků selhal. Důvodem bylo malé laterální rozlišení přístroje. V datech pořízených pomocí ISRWS nebylo možné rozlišit interferenční obrazec v místech s největším gradientem tloušťky vrstvy. Několik tmavých a světlých proužků v těchto oblastech vzorku se totiž zobrazilo na jeden pixel měřicí kamery a výsledná zaznamenaná intenzita tak z těchto dat byla zprůměrována. Její hodnota tedy neodpovídala skutečnosti.

Zvýšení laterálního rozlišení přístroje ISRWS by vyžadovalo kromě pořízení nové kamery s vyšším počtem pixelů také zásadní úpravy jeho zobrazovací sestavy. Kromě velkých nároků na cenu úprav (zachování schopnosti pracovat v UV oblasti spektra vyžaduje speciální kamery) by úpravy znamenaly vyřazení přístroje na dlouhou dobu z provozu. Lepším řešením se ukázalo navržení nového přístroje s vysokým laterálním rozlišením, u kterého by nebyly kladeny tak vysoké požadavky na spektrální rozsah.

Měření v UV spektrální oblasti klade obvykle vysoké nároky na optickou sestavu ISRM a rozdíl mezi ISRWS a ISRM s vyšším laterálním rozlišením (ISRER – z anglického Imaging Spectroscopic Reflectometer with Enhanced Resolution) toto potvrzují. Spektrální rozsah přístroje ISRER byl už ze zadaného požadavku na nižší náklady limitován kamerou pro viditelnou a případně blízkou infračervenou oblast spektra. To obecně rozšířilo možnosti použití optických dílů. Velmi významnou byla možnost použití membránového děliče jako jednoho ze základních prvků optické sestavy přístroje.

7.1. ZDROJ MONOCHROMATICKÉHO SVĚTLA

ISRER využívá jako zdroje světla tentýž monochromátor Jobin Yvon Triax 320 s xenonovou výbojkou XeUV firmy LOT–QuantumDesign jako přístroj ISRWS (viz podkapitola 6.1). K propojení monochromátoru a měřicí části přístroje se využívá kabel optických vláken s normalizovaným SMA konektorem.

U ISRER platí tedy stejně jako u ISRWS, že zdrojem monochromatického světla může být v principu jakýkoli zdroj s výstupem do kabelu optických vláken.

7.2. KOLIMÁTOR

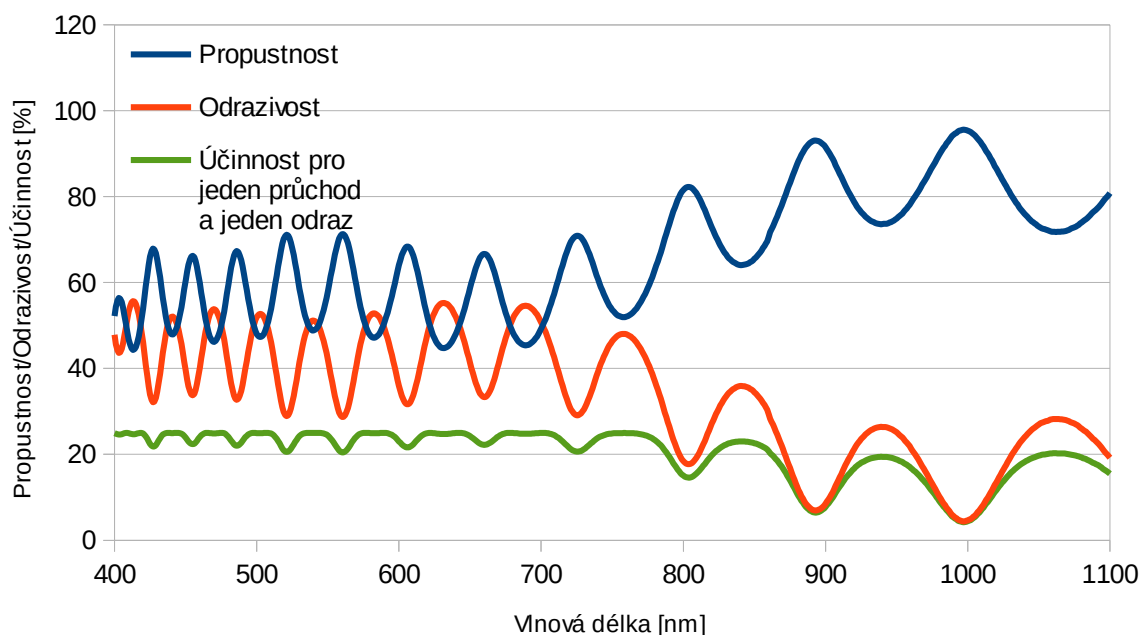
Při návrhu ISRER bylo poprvé použito mimoosové parabolické zrcadlo, konkrétně zrcadlo s průměrem 25,4 mm a ohniskovou vzdáleností 50,8 mm od firmy Edmund Optics Inc. Úroveň kolimování svazku ve srovnání s použitím sférického zrcadla se ukázala být tak vysoká, že za účelem zvýšení kvality předcházejícího přístroje ISRWS byl znovu stejným způsobem přepracován i kolimátor ISRWS.

7.3. MEMBRÁNOVÝ DĚLIČ

Přestože byl ISRER navržen jako přístroj s vyšším laterálním rozlišením, bylo také cílem zachovat velikost plochy vzorku zobrazované na čip CCD kamery. Požadované laterální rozlišení přístroje ISRER bylo v rozpětí 10 μm –20 μm . Toto rozpětí bylo dáno velikostí požadované zobrazované plochy vzorku a parametry kamer uvažovaných pro ISRER. Jak bylo zmíněno, přístroj ISRER byl navrhován primárně pro viditelnou a blízkou infračervenou spektrální oblast. Pro tuto spektrální oblast existují varianty všech děličů popsaných v podkapitole 3.4. Z hlediska konstrukce celého zařízení se ukázal jako nejvhodnější membránový dělič.

Zvolen byl membránový dělič od firmy Thorlabs, Inc. Děliče tohoto výrobce mají tloušťku membrány $d = 2 \mu\text{m}$ a index lomu materiálu membrány $n = 1,5$ pro vlnovou délku světla 550 nm. Dle vztahu (3.4.4) lze zkontrolovat, že posunutí x svazku bude pouze 0,84 μm při úhlu dopadu 45°. Lze vidět, že hodnota posunutí je o řád menší než hodnota rozlišení požadované. Vliv membránového děliče na zobrazení bude tedy zanedbatelný. Na rozdíl od klínového děliče v ISRWS není třeba vliv membránového děliče v ISRER nijak kompenzovat.

Komerčně prodávané membránové děliče se vyrábějí v různých variantách dělicích poměrů. Nejblíže má k ideálnímu dělicímu poměru zvolený membránový dělič výrobce Thorlabs, Inc. s dělicím poměrem 45/55 pro rozsah vlnových délek 400 nm–700 nm. Membránový dělič je, jak bylo popsáno, velmi tenká membrána, tudíž v ní dochází k interferenčním jevům a dělicí poměr 45/55 v deklarovaném rozsahu je spíše orientační (viz obrázek 7.3.1). Změny ve spektrální závislosti odrazivosti a propustnosti děliče mohou znamenat horší celkovou účinnost pro některé vlnové délky a tedy nižší intenzitu obrazu vytvořeného světlem takové vlnové délky. Měření přístrojem ISRM však umožňuje tyto změny kompenzovat nastavením vhodných expozičních časů měřicí kamery (viz 3.8.1).

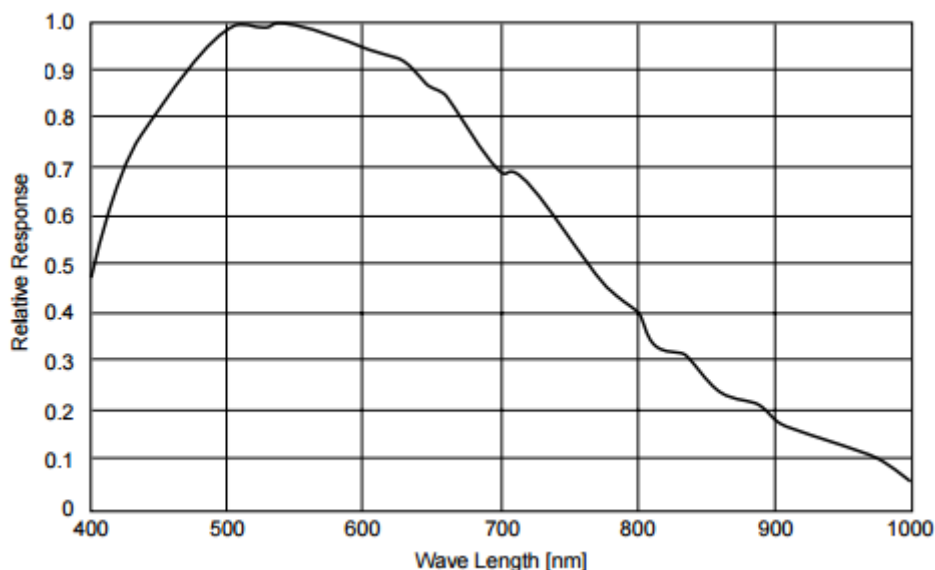


Obr. 7.3.1: Odrzivost, propustnost membránového děliče a jeho účinnost pro jeden průchod a jeden odraz světla na tomto děliči v rozsahu používaných vlnových délek [41].

Jak lze vidět v obrázku 7.3.1, celková účinnost děliče klesá ve vyšších vlnových délkách, než je výrobcem deklarováno. Pokles této účinnosti je však kompenzován možností prodloužit expoziční časy. Měření je tedy možné provádět až do 1100 nm (což je také obecně přijímaná mez pro křemíkové čipy CCD). Využití UV spektrální oblasti je limitováno jak kamerou, tak i faktem, že membrána, z níž je dělič vyroben, UV záření absorbuje. Technická mez membránového děliče je 250 nm kvůli absorpci materiálu membrány, běžně vyráběné děliče jsou navrženy až pro spektrální oblasti od 300 nm výše (bohužel tyto děliče mají výrazně menší spektrální rozsah než zvolený dělič). Zvyšující se absorpce membrány děliče v UV spektrální oblasti v kombinaci s klesající kvantovou účinností kamery (viz oddíl 7.4) způsobují, že je možné měření provádět přibližně od 400 nm výše.

7.4. KAMERA G1–1400

Kamera, která již byla zmíněna v předchozím paragrafu, je CCD kamera G1 – 1400 od výrobce Moravské přístroje a.s. Jedná se o základní astronomickou kameru, která využívá čip



Obr. 7.4.1: Orientační kvantová účinnost CCD čipu ICX285AL použitým v kameře G1–1400 [42].

Sony ICX285AL, jehož kvantová účinnost je znázorněna na obrázku 7.4.1. Výhodou tohoto čipu je poměr velikosti jeho pixelů ($6,45 \times 6,45 \mu\text{m}^2$), jejich počet (1360×1024) a celková (nízká) cena kamery. Kamera je chlazená pouze pasivně, nedisponuje chladicím systémem čipu. Temný proud je proto u kamery vyšší než v případě kamery ISRWS. Rozsah vlnových délek, ve kterých přístroj ISRER pracuje, neklade tak vysoké nároky na kameru, protože v tomto spektrálním rozsahu má výbojka výrazně vyšší svítivost a expoziční časy jsou proto kratší než je tomu v případě UV oblasti přístroje ISRWS.

7.4.1. ASCOM standard

Použití nové kamery jiného výrobce než v případě přístroje ISRWS s sebou neslo problém spočívající ve firmware kamery – nová kamera je v počítači ovládána jinými příkazy, než kamera Hamamatsu Orca II z přístroje ISRWS. Kamera G1–1400 podporuje standard ASCOM, který je šířen jako OpenSource a slouží k unifikaci ovládání astronomických zařízení. Většina kamer navržených pro astronomické účely tento standard podporuje, a protože parametry kamer pro astronomii a ISR se prakticky shodují, standard ASCOM se jeví jako univerzální řešení také pro přístroje ISRM.

Část software sloužící k ovládání kamery byla naprogramována podle standardu ASCOM, k přístroji ISRER lze proto jednoduše připojit jakoukoli kameru s C a CS montáží a ovládání je zajištěno pomocí velmi rozšířeného standardu.

7.5. VODOROVNÝ STOLEK PRO VZORKY

Výměna vzorků v přístroji ISRWS se i při použití zaměřování pomocí CCD kamery a laserového světelného svazku byla příliš náročná. Vzorky byly navíc upevňovány do držáku vzorků ve tvaru malého svěráku, vzorek tedy mohl být snadno poškozen. Jak bylo popsáno, zaměřovací systém nebylo možné rovněž použít pro všechny druhy vzorků.

U nového přístroje byl proto navržen vodorovný stavitelný stolek s výměnnými destičkami, v nichž byly otvory různé velikosti. Stolek byl doplněn jedním rovinným zrcadlem, které usměrňuje světelný svazek svisle vzhůru tak, aby dopadl na povrch vzorku skrze otvor v destičce stolku. Povrch destičky stolku je seřízen tak, aby byl právě v předmětové rovině zobrazovací soustavy ISRER. Vzorek leží na destičce měřeným povrchem dolů proti přicházejícímu světelnému svazku. Tato poloha by měla zaručit stejné nastavení měřených povrchů všech vzorků nezávisle na tloušťce jejich podložky. Stolek je také vhodný pro vzorky rozptylující.

Výměna vzorku je jednoduchá, vzorek se jednoduše položí na stolek. V případě vzorků různých rozměrů lze vyměnit destičku stolku za jinou, která má otvor velikosti odpovídající měřenému vzorku.

Nový návrh stolku se ukázal velmi efektivní do takové míry, že obdobný stolek (s kompatibilními destičkami) byl navržen a vyroben také pro starší přístroj ISRWS a laserový systém zaměřování byl zcela opuštěn, jak bylo naznačeno v dřívější kapitole. Jedinou nevýhodou je nemožnost selektivního nastavení vybrané oblasti povrchu velmi deformovaných vzorků (při použití laserové stopy to možné bylo). S takovými vzorky se ale při měření metodou ISR prakticky nesetkáváme.

7.6. NÁVRH ZOBRAZENÍ

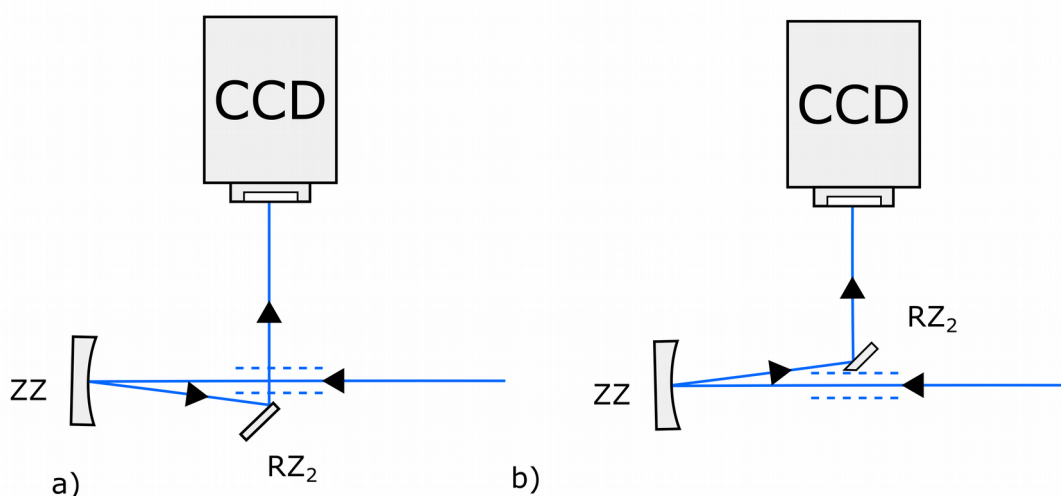
Praktická měření s přístrojem ISRWS ukázala, že velikost zobrazované plochy vzorku rovná přibližně $20 \times 20 \text{ mm}^2$ je dostačující. Při návrhu zobrazovací sestavy ISRER proto zůstal požadavek na tuto velikost stejný. Cílem tedy bylo zobrazit zmíněnou plochu vzorku na čip CCD kamery. Tím bylo definováno obrazové zvětšení přístroje. Zobrazení bylo koncipováno stejně jako u přístroje ISRWS použitím jediného sférického zrcadla. K návrhu zobrazovací soustavy byl použit optimalizační software Zemax (dnes OpticStudio). Pro přístroj ISRER se ukázalo optimální použití stejného zrcadla jako u přístroje ISRWS. Simulace také ukázaly, že by zobrazení mělo dosáhnout požadovaného laterálního rozlišení odpovídajícího nové kameře.

Protože jsou základní parametry zobrazení stejné jako u přístroje ISRWS, bylo otázkou, zda by nebylo možné zvýšit laterální rozlišení přístroje ISRWS pouze záměnou kamery. Experimentální testy ale ukázaly, že optická sestava přístroje ISRWS nedosahuje laterálního rozlišení, které bylo výsledkem simulace. Nejpravděpodobnější příčinou této skutečnosti je sestava klínů z materiálu homosil nacházejících se před zobrazovacím zrcadlem.

Absence kaskády klínů v ISRER také nastolila otázku, jak realizovat zobrazení zrcadlem. Klín před zrcadlem v přístroji ISRWS byl totiž použit jako druhý dělič umožňující osové zobrazení pomocí zrcadla. Tento systém evokuje variantu použití druhého děliče i v přístroji ISRER. Jak již ale bylo ukázáno, použití děliče, kterým světlo jednou projde a jednou je odraženo, znamená ztrátu 75% původní intenzity i při ideálních podmínkách (dělicí poměr 50/50). Zejména v případě ISRER s plánovaným použitím nechlazené kamery je ztráta světelné intenzity velmi významná. Ztráta intenzity totiž vede k delším expozičním časům a tedy celkově delšímu měření, a také k horšímu poměru signál/šum z důvodu vyššího temného proudu nechlazené kamery.

S využitím programu Zemax byla proto otestována varianta zobrazení mimoosového, tj. varianta se zobrazovacím zrcadlem mírně pootočeným vůči dopadajícímu svazku. Aby byl minimalizován úhel pootočení zobrazovacího zrcadla, který má velký vliv na vady v zobrazení, bylo do zobrazovací soustavy umístěno ještě jedno rovinné zrcadlo. Toto zrcadlo odklání světelný svazek z obrazového prostoru hned, jakmile bude tento svazek mimo dráhu dopadajícího svazku. Toto rovinné zrcadlo je možné umístit dvěma způsoby (obrázek 7.6.1a) a b)). V případě obr. 7.6.1a) je zrcadlo umístěno tak, že se od něj světelný svazek odráží tak, že kříží světelný svazek dopadající na zobrazovací zrcadlo, ve druhém případě (obr. 7.6.1b)) je světelný svazek směřován zrcadlem od dopadajícího světelného svazku, který nekříží.

Z konstrukčního hlediska je výhodnější řešení obr. 7.6.1a) Rovinné zrcadlo je totiž

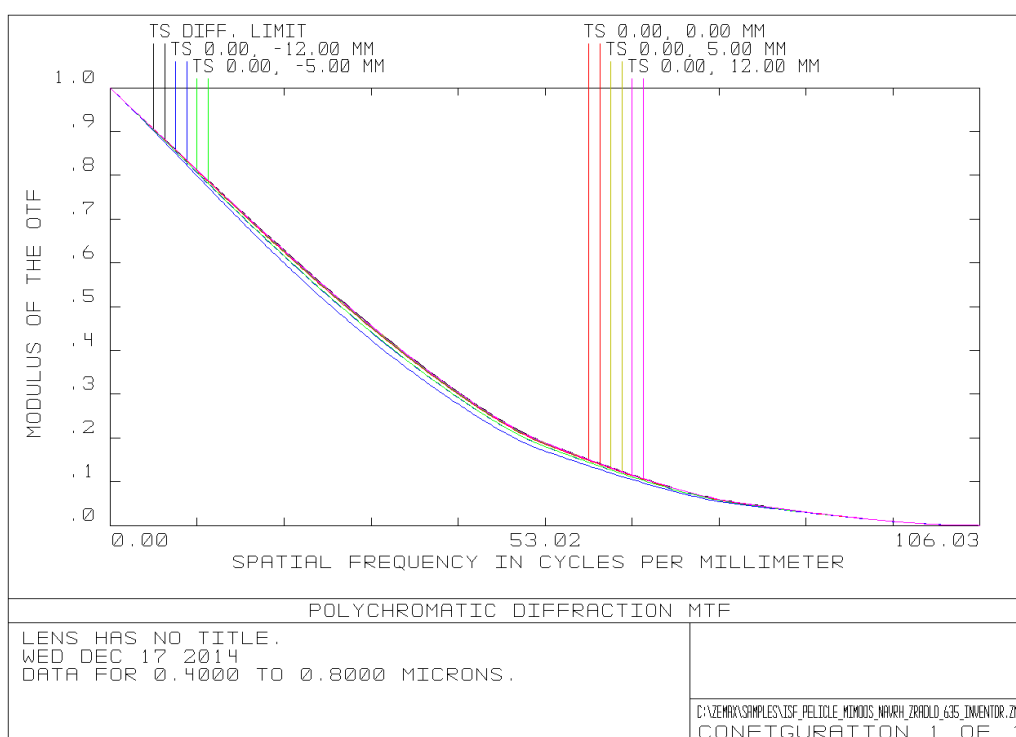


Obr. 7.6.1: Uspořádání s mírně pootočeným zobrazovacím zrcadlem (ZZ). Znázorněny jsou různé varianty umístění pomocného rovinného zrcadla (RZ₂). Čárkovanou čarou je znázorněn průřez světelného svazku [43].

umístěno na druhé straně skříně přístroje, než je umístěna kamera. Uchycení zrcadla se tak významně zjednoduší. Zrcadlo je navíc umístěno tak, že jeho skleněná podložka nestíní světelnému svazku směřujícímu na zobrazovací zrcadlo. Výhodou uspořádání obr. 7.6.1b) je možnost umístit zrcadlo dál od zobrazovacího zrcadla, protože není potřeba tak dlouhá

optická dráha mezi rovinným zrcadlem a čipem CCD kamery (nemusí překlenout průřez světelného svazku dopadajícího na zobrazovací zrcadlo). Zrcadlo je možné umístit tak, aby byl ještě více minimalizován úhel pootočení zobrazovacího zrcadla. První nevýhodou tohoto uspořádání je náročnější konstrukční řešení, kdy je zrcadlo i kamera na jedné straně skříně přístroje. Druhou nevýhodou je skutečnost, že podložka zrcadla stíní světelný svazek dopadající na zobrazovací zrcadlo. Podložka rovinného zrcadla by proto musela být seříznuta, aby ke stínění nedošlo a bylo možné využít výhody menšího pootočení zobrazovacího zrcadla.

Simulace zobrazení v programu Zemax ukázala, že rozdíl kvality zobrazení pro oba způsoby upevnění rovinného zrcadla je minimální. Nepatrně lepší kvalita zobrazení v případě uspořádání obr. 7.6.1b) daná menším úhlem pootočení zobrazovacího zrcadla tak nevyváží komplikace s konstrukcí uchycení zrcadla. Zobrazení je v obou případech dostatečně kvalitní

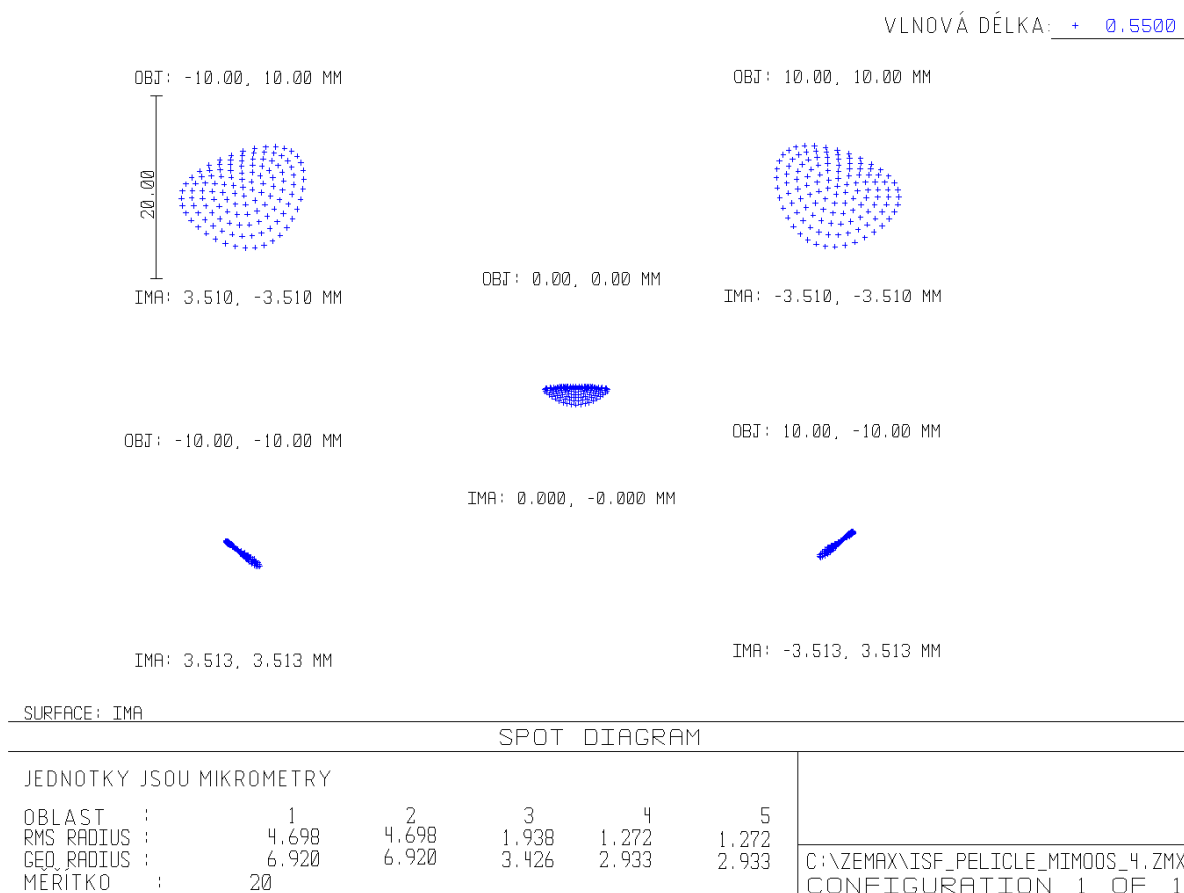


Obr. 7.6.2: Přenosové funkce kontrastu simulované optické sestavy. Černé křivky představují difrakční mez sestavy, křivky dalších barev pak přenosové funkce kontrastu pro jednotlivé vybrané body vzorku (souřadnice bodů jsou uvedeny nad grafy ve formátu TS x, y MM, např. bod ležící v optické ose je označen TS 0.00, 0.00 MM, křivky T a S označují tangenciální a sagitální rovinu zobrazení). Lze si povšimnout, že se všechny křivky téměř překrývají s difrakční mezí [43].

pro použití s plánovanou kamerou. Simulovaná přenosová funkce pro případ obr. 7.6.1a) je znázorněna na obrázku 7.6.2.

Celé zobrazení je vlastně limitováno difrakční mezí (simulované přenosové funkce se překrývají s křivkami difrakční meze přenosové funkce). Kontrolu rozlišení je možné provést pomocí tzv. spot diagramu, což je znázornění, jak bude širokým světelným svazkem zobrazen

dokonalý bod v předmětové rovině (znázorněno na obrázku 7.7.1). Geometrický poloměr nejkrajnějšího bodu bude mít přibližně 6 μm , což je hodnota srovnatelná s rozlišením plánované kamery. Zobrazení by tedy mělo být velmi ostré.



Obr. 7.7.1: Spot diagram pro jednotlivé vybrané body vzorku (souřadnice bodů jsou uvedeny nad grafy ve formátu OBJ: x, y MM, např. bod ležící v optické ose je označen OBJ: 0.00, 0.00 MM). Lze si povšimnout vlivu mimoosového zobrazení [43].

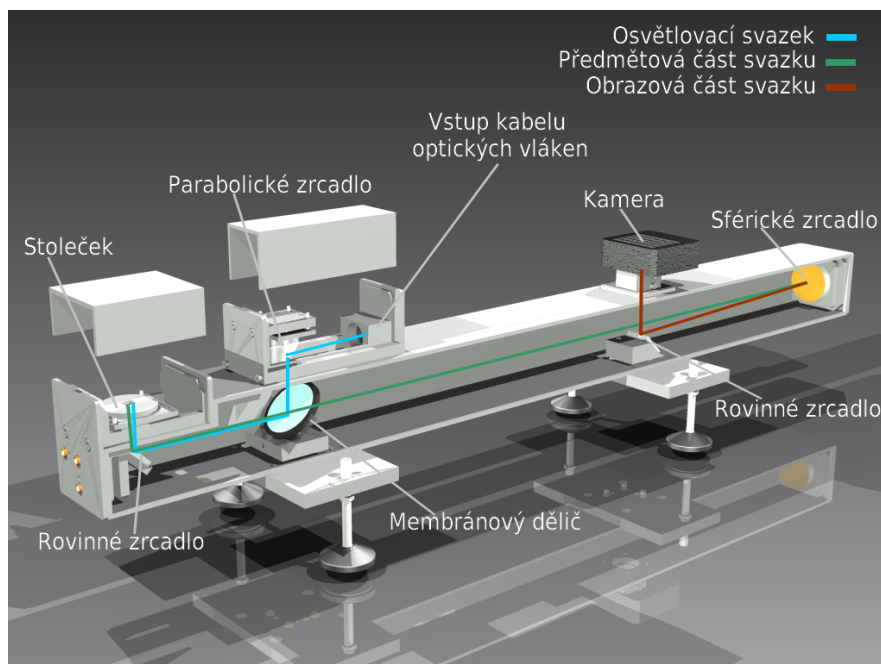
7.7. NÁVRH A KONSTRUKCE

Přístroj ISRER byl navržen odlišným způsobem než přístroj ISRWS. Přístroj ISRWS byl svého druhu prvním kompletním přístrojem. Jeho základem byla tuhá deska, na kterou byly pomocí jednotlivých držáků upevňovány optické prvky. Tento přístup umožnil mnohé úpravy přístroje, které jsou popsány v předchozích kapitolách.

Protože přístroj ISRER vznikl až po několika letech zkušeností s používáním přístroje ISRWS jako druhá generace reflektometru, byl navržen již bez základní nosné desky a se samonosnou skříní. To usnadnilo montáž přístroje. Byla tak také zvýšena tuhost zařízení a byla minimalizována velikost přístroje.

Tělo přístroje je tvořeno hranatou duralovou trubkou (počítačem vygenerovaná ilustrace přístroje je znázorněna na obrázku 7.7.2), do které jsou skrze otvory umístěny držáky s jednotlivými optickými prvky. Tak je zaručena světlotěsnost přístroje, jednotlivé prvky je

možné seřizovat a v případě potřeby vyměnit individuálně. Všechny seřizovací prvky jednotlivých držáků prvků se nacházejí vně těla přístroje, přístroj je tedy možné seřizovat bez jakékoliv demontáže.



Obr. 7.7.2: Počítačem vytvořená ilustrace návrhu přístroje ISRER s odkrytou boční stěnou těla přístroje.

S ohledem na požadavek redukce ceny celého přístroje a zachování přesnosti uložení optických prvků nebyly jejich držáky zakoupeny jako celky, ale byly vyrobeny s využitím zakoupených přesných šroubů. Tyto šrouby umožňují přesné a jednoduché seřízení přístroje. Zbytek držáků může být vyroben s většími tolerancemi a nižšími náklady než v případě zakoupení celého komerčního držáku.

Kolimátor přístroje je navržen jako samostatný modul, a to z toho důvodu, aby bylo možné jednoduše zkontrolovat jeho seřízení a ověřit rovnoběžnost světelného svazku z něj vystupujícího. Kolimátor je tvořen jedním mimoosovým parabolickým zrcadlem, v jehož ohnisku je umístěn výstup kabelu optických vláken. Po sejmutí krytu kolimátoru je možné seřizovat natočení parabolického zrcadla a nastavit tak přesně směr, ve kterém dopadá osvětlovací svazek na dělič svazku. K připojení kabelu optických vláken je použit normalizovaný SMA konektor, k přístroji je tak možné připojit celou řadu zdrojů monochromatického světla. Jedinou podmínkou je, aby bylo možné navázat z nich vystupující světelný svazek do kabelu optických vláken.

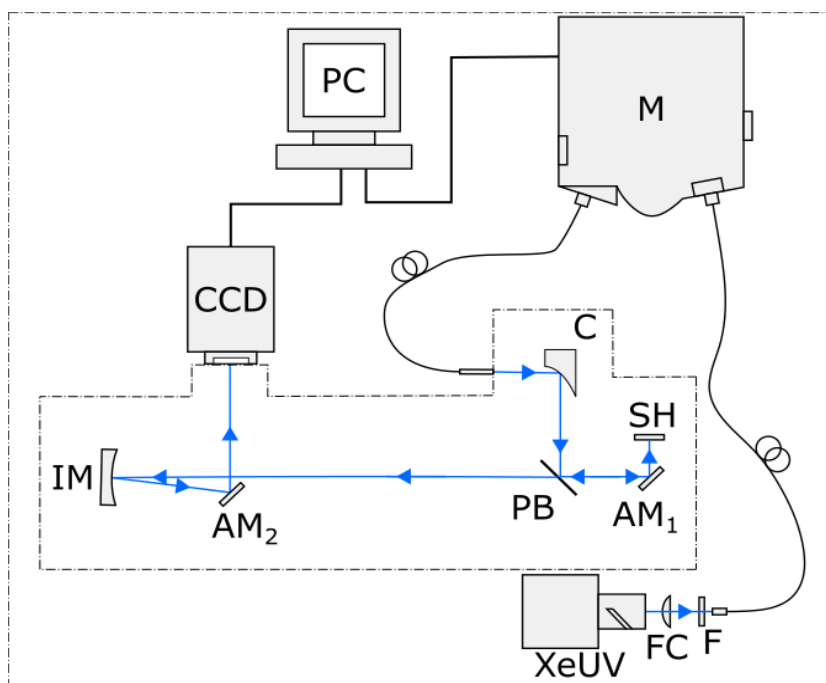
Se záměrem možné výměny všech klíčových dílů optické sestavy byl také navržen držák membránového děliče. Ten využívá standardní úchyt dodávaný výrobcem, který je součástí zkonstruovaného nastavitelného držáku. Kromě úhlového seřízení je tak možné membránový dělič v případě potřeby vyměnit za jiný.

Upevnění kamery je také řešeno modulárně. Držák kamery podporuje standardní C a CS montáž, tj. normalizované objímky podporované všemi významnějšími výrobci vědeckých a astronomických kamer. Celý držák je vertikálně stavitelný. Posuvem kamery blíž nebo dál (je realizován objímkou se závitem) od zobrazovacího zrcadla je možné ztotožnit povrch CCD čipu kamery a obrazovou rovinu zobrazovací sestavy. Kameru je tak možné nejen snadno seřadit, ale také vyměnit za jinou.

Parametry ostatních optických prvků, tj. zrcadel realizujících zobrazení, jsou dány rozměry skříně přístroje. Protože mají vysokou odrazivost ve velmi širokém spektrálním rozsahu a jejich výměnou není možné nijak upravovat parametry přístroje (předmětová a obrazová vzdálenost jsou pevně dány konstrukcí skříně), jsou tyto prvky upevněny k držákům pevně. Je pouze možné je precizně seřizovat natočením držáků.

Výměnou hlavních částí, tj. děliče svazku, kamery a světelného zdroje je možné přístroj jednoduše upravit pro různé spektrální rozsahy.

Schéma celého přístroje je znázorněno na obrázku 7.7.3.



Obr. 7.7.3: Schéma ISRER; XeUV – xenonová lampa, FC – fokusační čočka, F – filtr, M – monochromátor, C – kolimátor, PB – membránový dělič, IM – zobrazovací zrcadlo, CCD – měřicí kamera, $AM_{1,2}$ – pomocná rovinná zrcadla, SH – studovaný nebo referenční vzorek, PC – počítač.

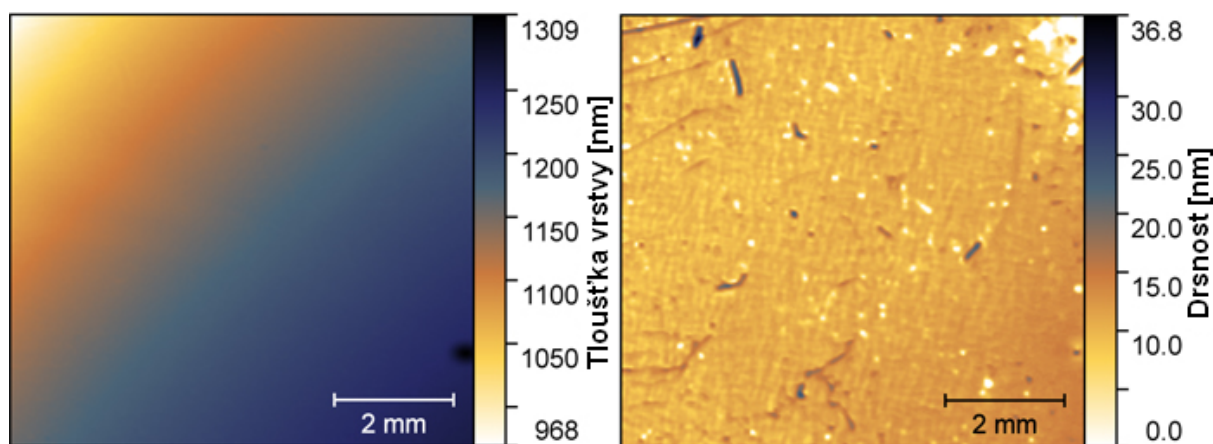
8. MĚŘENÍ PROVEDENÁ POMOCÍ ZOBRAZOVACÍCH SPEKTROSKOPICKÝCH REFLEKTOMETRŮ

Přístroje ISRM byly použity pro měření celé řady různých vzorků. Většinou se jednalo o vzorky vrstev, u nichž bylo cílem určit lokální parametry vrstvy, tj. lokální tloušťku a lokální optické konstanty. Technika ISR je založena na měření spektrální závislosti lokální relativní odrazivosti vzorků. Její aplikace tak mohou být širší, než je pouze určování map optických parametrů vzorků tenkých vrstev.

8.1. MĚŘENÍ LOKÁLNÍCH OPTICKÝCH PARAMETRŮ PODÉL PLOCHY VZORKŮ TENKÝCH VRSTEV

8.1.1. Vrstvy ZnSe na GaAs

Vrstvy ZnSe jsou velmi důležité v optoelektronice. I když je technologie jejich výroby v komerční oblasti na vysoké úrovni, v počátku zavádění této výroby mohou zmíněné vrstvy vykazovat velké neuniformity. Technika ISR byla v případě zmíněných vrstev použita jako samostatná metoda k určení nejen mapy lokální tloušťky, ale i spektrálních závislostí lokálních optických konstant. Experimentální data měření pomocí ISR byla využita také k určení drsnosti povrchu horního rozhraní vrstvy. Při vyhodnocování bylo použito metody ISR nejprve jako doplňkové metody k určení mapy lokálních tlouštěk a hodnoty RMS drsnosti [15], později jako samostatné „multi-pixel“ metody k určení všech hledaných parametrů (viz obrázek 8.1.1) [18]

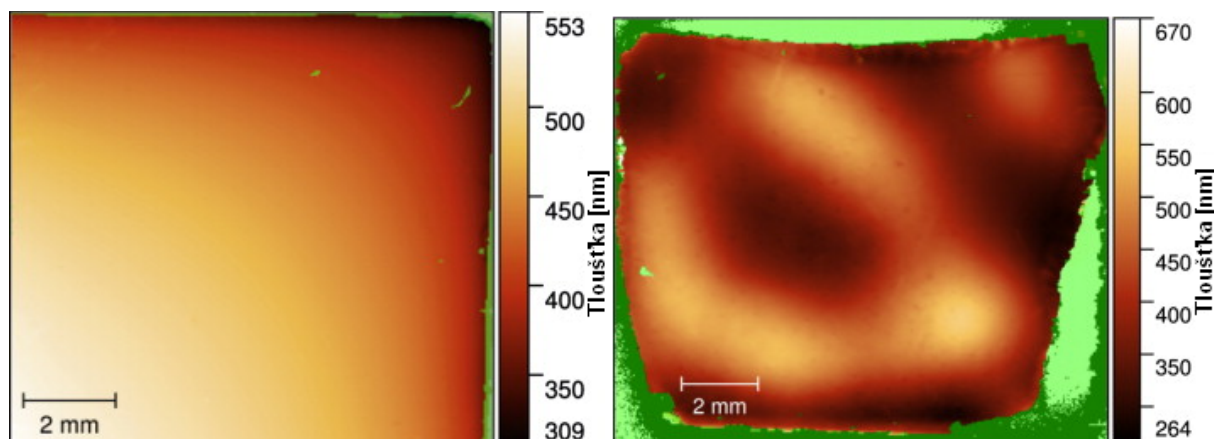


Obr. 8.1.1: Mapy tloušťky a drsnosti vzorku ZnSe. [18]

8.1.2. Vrstvy $\text{SiO}_x\text{C}_y\text{H}_z$ a CN_xH

Technika ISR je také vhodná ke studiu organických vrstev. Jako v mnoha případech také zde v počátcích vývoje technologie vytváření vrstev mohou výsledné vrstvy projevovat značné neuniformity. Dvě neuniformní vrstvy z materiálů $\text{SiO}_x\text{C}_y\text{H}_z$ and CN_xH byly vytvořeny na podložce monokrystalického Si. Lokální optické parametry byly určeny pro vrstvu $\text{SiO}_x\text{C}_y\text{H}_z$ nejprve v kombinaci s konvenčními technikami jako VASE a SR. Technika ISR pak byla použita pouze k určení mapy lokálních tlouštěk vzorku [19] V další publikaci [31] už

byly parametry vrstev $\text{SiO}_x\text{C}_y\text{H}_z$ a CN_xH určeny pouze na základě ISR měření využitím „multi-pixel“ metody ISR (viz obrázek 8.2.1).



Obr. 8.2.1: Mapy tloušťky $\text{SiO}_x\text{C}_y\text{H}_z$ a CN_xH [31].

8.2. VZORKY S VYSOKÝMI GRADIENTY TLOUŠŤKY

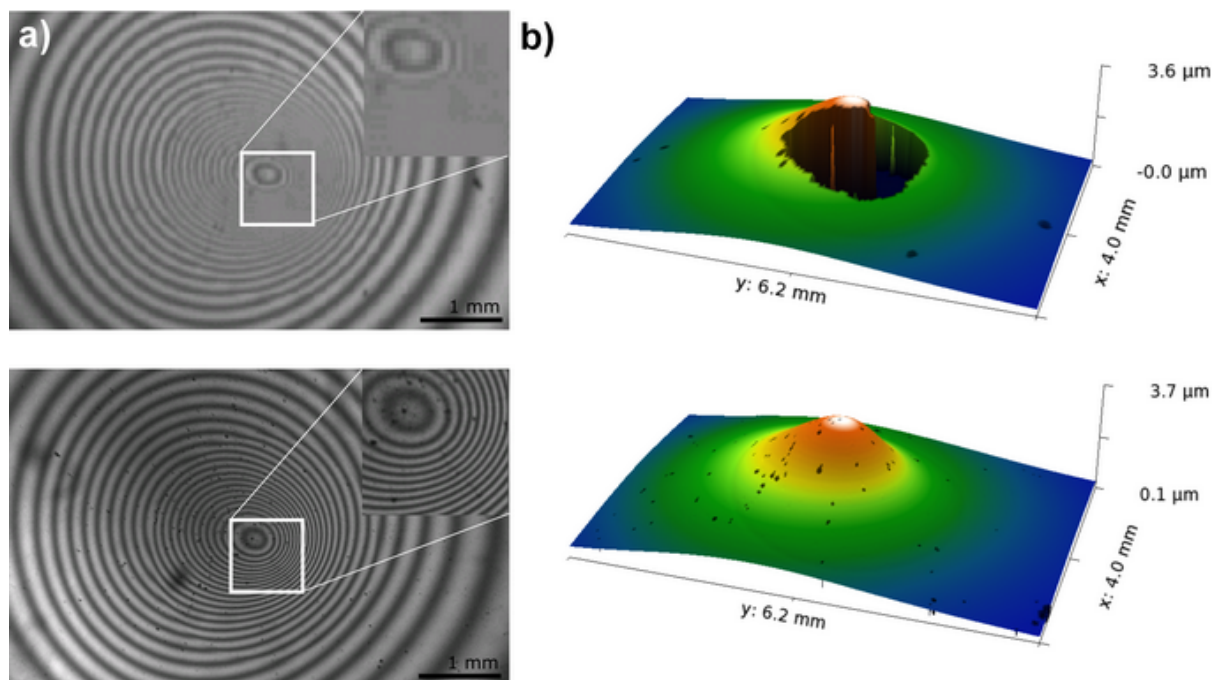
Omezení přístroje ISRWS a hlavně potenciál techniky ISR se poprvé projeví u vzorků vrstev SiO_2 na podložkách monokrystalického Si připravených pomocí technologie plasma jet. Vrstvy takto připravené se vyznačují velkými gradienty v tloušťce vrstvy. Technologií plasma jet jsou totiž tepelně ovlivňovány pouze malé vybrané oblasti na povrchu vzorku. Zatímco SiO_2 je velmi dobře známou optickou vrstvou s dobře definovanými n a k , zkoumat, do jakých tvarů vyrostly vrstvy vlivem plasma jet technologie je obecně náročný úkol.

Technika ISR se v tomto případě ukázala nedocenitelnou, protože jako prakticky jediná byla schopna nedestruktivně zaznamenat průběh lokální tloušťky vrstvy vytvořené technologií plasma jet [25] ISR byla použita jako samostatná metoda pro určení optických parametřů vrstvy vytvořené z hexamethyldisiloxanu technologií plasma jet a byla srovnána s konvenčními technikami měření profilů vrstev – dotykovou profilometrií a mikroskopií atomárních sil AFM.

Vzorky připravené technologií plasma jet byly inspirací k návrhu přístroje ISRER. U některých vzorků s velmi velkými gradienty tloušťky již totiž bylo obrazové rozlišení přístroje ISRWS nedostatečné a nebylo tak možné vyhodnotit celou plochu vzorku. Zvýšení prostorového rozlišení techniky ISR se ukázalo být velmi žádoucí.

Problém nižšího obrazového rozlišení lze velmi dobře ukázat na příkladu měření tloušťky velmi neuniformních vrstev, kdy je potřeba, aby ve vrstvě vznikla interference světla. Ze závislosti interferenčního obrazce na vlnové délce lze pak tloušťku určit. Nižší obrazové rozlišení může vést k tomu, že se v případě vrstev s velkými gradienty v tloušťce zobrazí více interferenčních proužků na jeden pixel CCD kamery. Tyto proužky pak nebude možné rozlišit, pixel zaznamená pouze celkovou intenzitu světla na něj dopadajícího. Tím nastane zprůměrování hodnot okamžité intenzity a místo kombinace tmavých a světlých proužků (indikujících velký gradient ve vrstvě) bude v záznamu pouze průměrná hodnota signálu, tj.

velmi odlišná informace oproti realitě. Na obrázku 8.3.1a) je záznam téhož vzorku vytvořeného technologií plasma jet, který byl získán oběma přístroji. Rozdíl mezi záznamy je jasně patrný. To ještě lépe znázorňují zjištěné mapy tlouštěk na obrázku 8.3.1b), kde lze jasně vidět hranice, kdy ještě bylo možné data z ISRWS zpracovat a kdy byl gradient neuniformity už příliš vysoký.



Obr. 8.3.1: Výřezy záznamů a 3D mapy tlouštěk vzorku vrstvy hexamethyldisiloxanu připraveného technologií plasma jet. Nahoře je uveden záznam ze staršího ISRWS, dole pak z nového ISRER. Oba záznamy vlevo byly vytvořeny při vlnové délce 400 nm [43].

8.3. MĚŘENÍ ABSOLUTNÍ ODRAZIVOSTI VZORKU

Technika ISR je v principu relativní (odrazivost studovaného vzorku je srovnávána s odrazivostí vzorku referenčního). Při použití známého referenčního vzorku je možné získat také hodnoty absolutní odrazivosti studovaného vzorku (numerický model již může počítat se vstupními daty ve formě relativní odrazivosti). V některých případech (například při studiu vnějších atmosferických vlivů na kvalitu plochy zrcadel těmto vlivům vystavených) je znalost mapy lokální absolutní odrazivosti nezbytná.

Výhodou techniky ISR je zobrazovací podstata měření a možnost srovnání jednotlivých míst na vzorku. Dojde-li k lokálním změnám odrazivosti nemusí je konvenční SR odhalit.

8.4. MĚŘENÍ ÚROVNĚ REDUKCE KOVŮ Z ORGANICKÝCH SLOUČENIN

Základním výstupem měření technikou ISR je mapa spektrální závislosti relativní lokální odrazivosti vzorku. Jelikož je tato odrazivost závislá na chemickém složení vrstvy, je možné data z ISR použít také k detekci chemických prvků ve vrstvě.

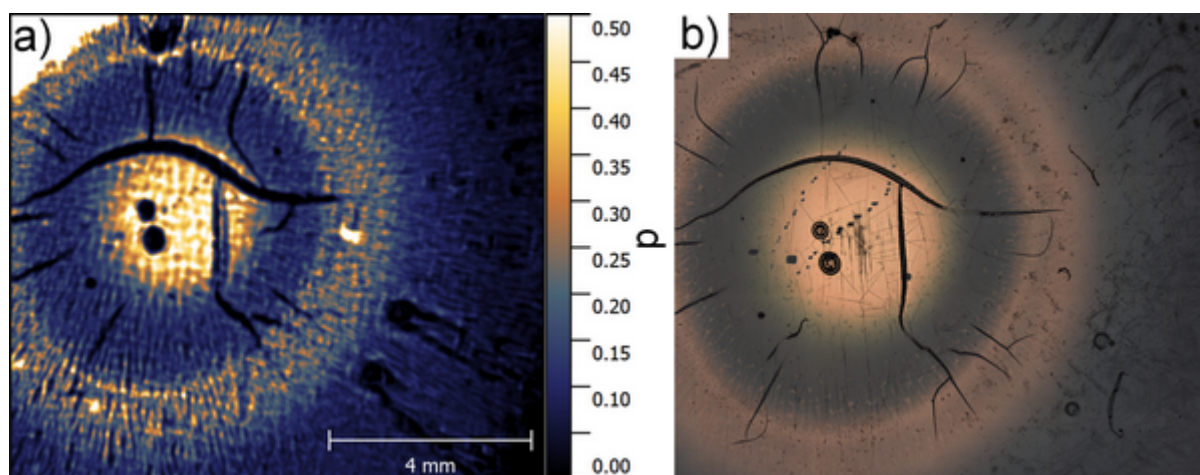
Pomocí technologie plasma jet je možné vzorky lokálně tepelně ovlivňovat. Takovýto tepelný vliv může vyvolat chemické procesy ve vrstvě. Jednou z možných aplikací technologie plasma jet je vytváření vodivých spojení mezi vybranými místy na vzorku. U vybraných organometalických sloučenin nastane při vystavení vysokým teplotám plasmu lokální redukce kovu v jeho metalické formě. Takto by mělo být možné vytvořit kovové vodivé spojení na vzorku.

Princip charakterizace takovýchto vzorků pomocí techniky ISR je založen na tom, že organometalická sloučenina a kov (například zlato) v metalické formě mají výrazně rozdílnou spektrální závislost odrazivosti. Zatímco zlato v metalické formě má ve viditelném a infračerveném spektru vysokou a velmi dobře známou spektrální závislost odrazivosti, základní organometalická sloučenina světlo relativně silně absorbuje.

V případě, který byl studován pomocí techniky ISR bylo využito toho, že zlato v metalické formě nepropouští téměř žádné světlo a organometalická sloučenina byla velmi tlustá. V výstupních experimentálních datech se tedy neprojevovalo zadní rozhraní. Jejich vyhodnocení tak bylo založeno pouze na rozlišení odrazivostí obou materiálů. Byl při tom použit model, ve kterém oblast studovaného vzorku zobrazená na každý pixel CCD čipu je částečně pokryta čistým zlatem a částečně organickou sloučeninou. Z výstupního signálu každého CCD pixelu se pak určoval poměr ploch připadajících jednotlivým materiálům. Označí-li se tento poměr jako p , spektrální lokální odrazivost zlata jako R_{Au} , spektrální lokální odrazivost organického materiálu jako R_{org} a měřená relativní lokální odrazivost jako R , platí

$$R(\lambda) = p R_{Au}(\lambda) + (1 - p) R_{org}(\lambda) \quad (8.4.1)$$

Na obrázku 8.4.1a) je znázorněna mapa hodnot p ve srovnání s měřením provedeným pomocí konfokálního mikroskopu 8.4.1b). Obrázek z konfokálního mikroskopu vypadá na pohled lépe z důvodu jeho vyššího laterálního rozlišení. Mapa p získaná pomocí ISRWS ale poskytuje kvantitativní informaci o míře redukce zlata z organometalické sloučeniny vlivem plasmu. Důležité je také zmínit, že horší laterální rozlišení je omezením přístroje ISRM, ne však techniky ISR. To byl také důvod vzniku přístroje ISRER, zde prezentované měření však bylo provedeno ještě před uvedením ISRER do provozu. Studovaný vzorek posloužil k dalším nevratným experimentům, měření tak nebylo možné opakovat [32].



Obr. 8.4.1: Srovnání snímku a) mapy úrovně p redukce zlata ze vzorku vystaveného působení plama jet a b) z konfokálního mikroskopu [32].

9. DALŠÍ VÝVOJ ZOBRAZOVACÍCH TECHNIK

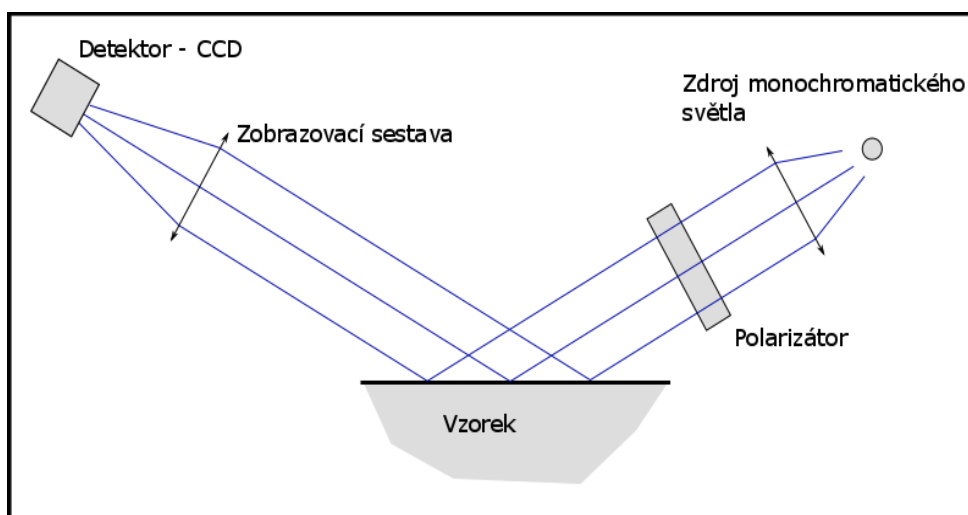
Technika ISR prošla za dobu své existence řadou vylepšení jak v oblasti vylepšování přístrojů (zvětšování jejich spektrálního rozsahu a obrazového rozlišení), tak i v oblasti vyhodnocování naměřených dat. Z pozice doplňkové metody ke konvenčním metodám VASE a SR pro určení průběhu tloušťky vrstvy podél plochy byly pro některé případy vypracovány zcela samostatné metody ISR určující i optické konstanty n a k vrstev. Omezení techniky ISR a s ní spojených metod ISR při kolmém dopadu světla stále existují. V případě vrstev velmi se lišících od vrstev ideálních tato technika není už schopna poskytnout dostatek měřených dat, aby bylo možné ISR obecně používat jako samostatný způsob charakterizace optických vlastností tenkých vrstev.

9.1. ZOBRAZOVACÍ SPEKTROSKOPICKÁ REFLEKTOMETRIE S PROMĚNNÝM ÚHLEM DOPADU

Možností, jak lze měřením technikou ISR získat více informací pro vyhodnocení výše uvedených neideálních tenkých vrstev, je rozlišit odrazivost vrstev pro složku světla kolmou k rovině dopadu a složku rovnoběžnou s rovinou dopadu. K tomu je nutné provádět měření pod nenulovým úhlem dopadu.

Takové měření znamená výrazné změny v návrhu celého přístroje ISRM. Použití děliče světelného svazku již není potřeba, jelikož měření se běžně provádí v okolí Brewstrova úhlu, tedy pod úhly výrazně většími než nula. Protože CCD čipy měří pouze intenzitu světla, ne jeho polarizaci, je potřeba do celé sestavy kromě systému nastavení úhlu dopadu doplnit také lineární polarizátor světla.

Jak je vidět z nákresu ISRM s proměnným úhlem dopadu (obrázek 9.1.1), tento se nápadně podobá schématu konvenčního spektroskopického elipsometru s proměnným úhlem. Ve srovnání s tímto elipsometrem v principu chybí totiž v systému ISRM už pouze jeden polarizátor (analyzátor).



Obr. 9.1.1: Schéma ISRM s proměnným úhlem dopadu.

9.2. ZOBRAZOVACÍ SPEKTROSKOPICKÁ ELIPSOMETRIE S PROMĚNNÝM ÚHLEM DOPADU

Protože je z konstrukčního pohledu mezi přístrojem ISRM s proměnným úhlem dopadu a zobrazovacím spektroskopickým elipsometrem s proměnným úhlem dopadu (IVASEM z anglického Imaging Variable Angle of Incidence Spectroscopic Ellipsometer) relativně malý rozdíl, je logické přistoupit přímo k návrhu tohoto elipsometru. Elipsometrie totiž ve srovnání s reflektometrií poskytuje o měřeném vzorku více informací.

Na rozdíl od ISR, základy zobrazovací elipsometrie byly popsány již koncem 80. let 20. století [33]. Přesto se nejedná o rozšířenou techniku měření. V době psaní této práce existuje pouze jediný komerční výrobce zobrazovacího spektroskopického elipsometru, který je založen na kombinaci mikroskopie a automatické nulové elipsometrie. Další přístroje (většinou laboratorní vzory) pracují v konfiguraci nulové elipsometrie (null ellipsometry) [34], mimonulové elipsometrie (off-null ellipsometry) [35], nebo makro elipsometrie [36]. Stejně jako u konvenční VASE je k dispozici mnohem více konstrukčních a technologických řešení, než jsou výše uvedená. Ukazuje se, že technika zobrazovací spektroskopické elipsometrie s proměnným úhlem dopadu je oblast relativně neprozkoumaná.

Předpokládá se, že vývoj techniky ISR na ÚFI VUT v Brně plynule přejde na vývoj techniky IVASE, která má mnoho společného nejen s konvenční elipsometrií, ale také s ISR. Do jisté míry se dá IVASE považovat za evoluci ISR.

9.3. PRVOTNÍ NÁVRH ZOBRAZOVACÍHO SPEKTROSKOPICKÉHO ELIPSOMETRU S PROMĚNNÝM ÚHLEM DOPADU

Omezený objem získaných informací z ISR, který techniku do jisté míry předurčuje k roli techniky doplňkové (kromě vybraných aplikací (viz podkapitola 4.3), vedl k tvorbě konstrukčního návrhu nejprve ISRM s proměnným úhlem dopadu a následně k návrhu IVASEM.

Základem navrženého elipsometru je goniometr, pomocí kterého je možné přesně nastavovat úhel dopadu světelného svazku na studovaný vzorek. Stejně jako v případě ISRM i v případě IVASEM by na vzorek měl dopadat monochromatický kolimovaný světelný svazek, což zaručuje stejné podmínky dopadajícího svazku podél celého měřeného povrchu studovaného vzorku. Aby bylo možné sledovat změny polarizace světelného svazku po interakci se vzorkem, je nutno světelný svazek dopadající na povrch vzorku cíleně polarizovat. Stejně jako v konvenčních elipsometrech bude tedy třeba do systému zařadit polarizátor. Měření změny polarizace světelného svazku po odrazu od studovaného vzorku umožní analyzátor umístěný za vzorkem. Důležité také je, aby mezi polarizátorem a analyzátozem ležel pouze studovaný vzorek, případně aby optické prvky nacházející se mezi těmito dvěma polarizátory nijak neovlivňovaly polarizaci světla. Podle konfigurace elipsometru ještě může být některý z polarizátorů doplněn o kompenzátor. Zobrazovací

sestava se bude nacházet až za analyzátozem a stejně jako v případě ISR by mělo jít o sestavu bez chromatických vad v zobrazení.

9.3.1. Goniometr

Protože přítomnost polarizačních prvků způsobuje významný pokles intenzity světla a zobrazování vzorku pod nenulovým úhlem dopadu může znamenat nutnost proměřovat také skrze hloubku ostrosti (tj. více vzájemně navazujících snímků pro jeden úhel a jednu vlnovou délku), je důležité, aby expoziční časy měřicí kamery byly minimalizovány. Pro návrh IVASEM byla proto zvolena varianta monochromátoru se světelným zdrojem přímo integrovaná do osvětlovacího ramene přístroje. Goniometr proto musí mít vysokou nosnost a samosvornost. Nemůže nastat situace (například výpadek proudu), kdy by se mohlo rameno goniometru pohybovat pouze vlastní vahou. K pohonu byl proto zvolen šnekový převod, který také umožní vysokou přesnost nastavení využitím vysokého převodového poměru šnekového soukolí. Šnekový převod je zaručeně samosvorný a hmotnost jednotlivých ramen zaručuje vymezení vůle v převodu.

9.3.2. Zdroj světla

Vyzařovaným výkonem, spektrálním rozsahem a také přiměřenou hmotností plně vyhovuje pro potřeby elipsometru světelný zdroj použitý v ISRWS. Pro použití v IVASEM je plánováno použití xenonové výbojky vyzařující až do UV části spektra. Na zdroji bude potřeba udělat několik drobných úprav, které umožní měření při natočení ramene goniometru (s nímž je lampa pevně spojena) do různých úhlů – lampa je od výrobce navržena pro měření pouze v její svislé poloze.

9.3.3. Monochromátor

Pro omezení rozptýleného světla v osvětlovacím svazku je nezbytné v elipsometru použít dvojitý monochromátor. Konvenční dvojitě monochromátory jsou ale řešeny jako sériové propojení dvou jednoduchých monochromátorů. Takové řešení je ale prostorově náročné, nebylo by tedy možné takový kombinovaný monochromátor upevnit přímo na rameno goniometru. Proto byl navržen monochromátor nový tvořený dvojicí monochromátorů v uspořádání Czerny–Turner umístěných nad sebou. Jejich difrakční mřížky budou umístěny také nad sebou na společné otočné ose. V jedné polovině tohoto dvojitého monochromátoru se bude využívat +1. řád difrakce, v druhé pak –1. řád difrakce. Ovládání monochromátoru tak bude prováděno natáčením jediného prvku, tj. držáku obou difrakčních mřížek.

Celý monochromátor by tak měl být výrazně kompaktnější a tím vhodnější k umístění na rameno goniometru.

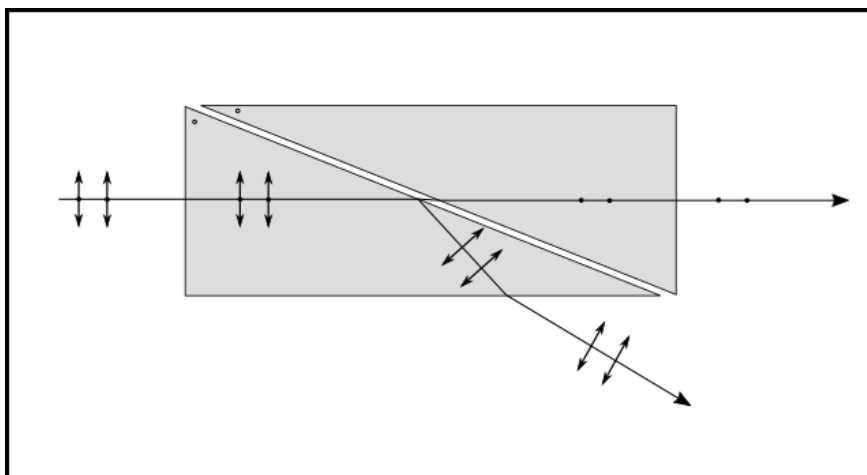
9.3.4. Zobrazovací soustava

Mírně mimoosové zobrazení použité v ISRER je s velkou výhodou uplatnitelné i v IVASEM. Zobrazovací soustava může zůstat téměř zachována, při zobrazení se počítá s

obdobným zvětšením a zorným polem. Při šikmém úhlu dopadu světelného svazku na vzorek bude potřeba skenovat studovaný vzorek skrze hloubku ostrosti zobrazovací soustavy. To by mělo být řešeno posuvem celého zobrazovacího ramene, které bude mít fixní zaostřenou oblast. Posuvem celé optické sestavy od, nebo ke vzorku se do zaostřené vzdálenosti dostane vždy jiná část vzorku. Z takto vytvořené série snímků je jejich navázáním možné vytvořit jeden ostrý obraz.

9.3.5. Polarizační prvky

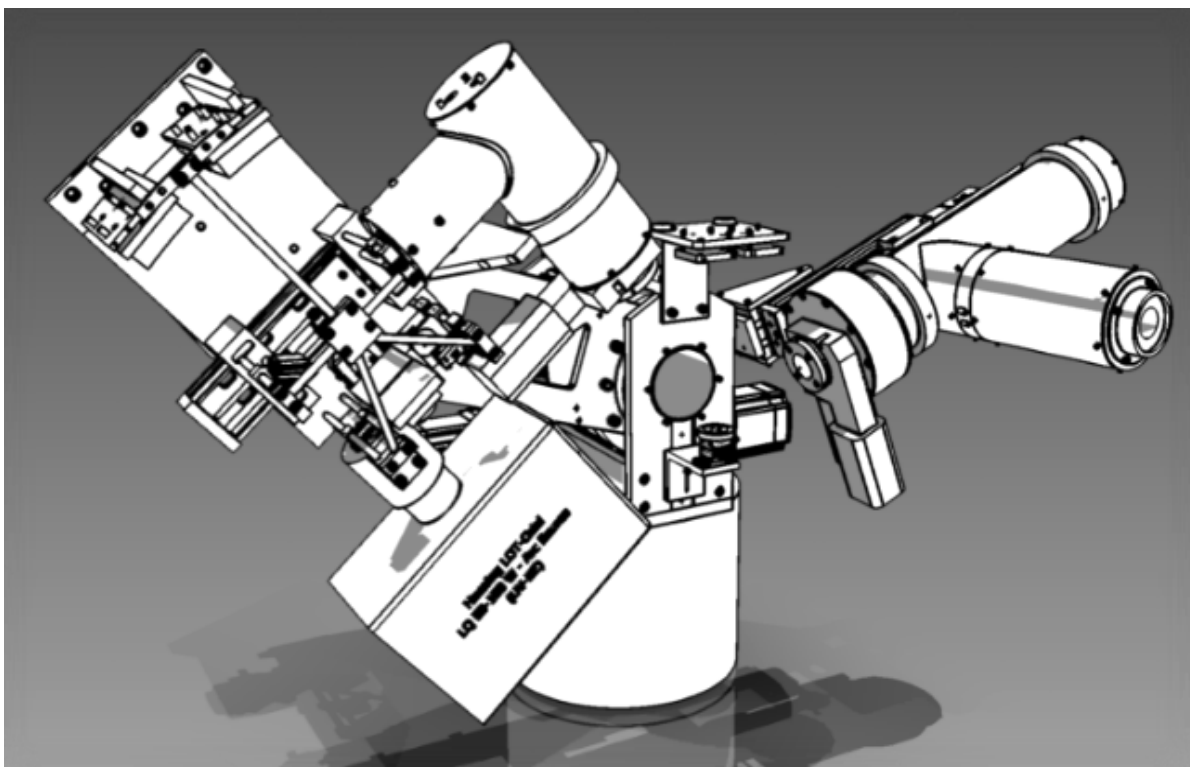
Na polarizační prvky použité v IVASEM jsou kladeny dva požadavky. Stejně jako u většiny elipsometrických aplikací je požadována vysoká úroveň polarizace dosažitelná těmito prvky a současně musí mít polarizační prvky v IVASEM velkou aperturu. Velikost výrobitelných polarizačních prvků ovlivňuje zorné pole celého přístroje, protože omezuje velikost zdrojového světelného svazku. Nejlepší poměr velikosti a úrovně polarizace měly polarizátory typu Glan–Thompson o velikosti 25 x 25 mm² (znázorněno na obrázku 9.3.1).



Obr. 9.3.1: Schéma polarizátoru typu Glan–Thompson.

9.3.6. Konstrukční návrh zobrazovacího spektroskopického elipsometru s proměnným úhlem dopadu

V současné době je připraven konstrukční návrh IVASEM (viz. Obrázek 9.3.2). Realizace tohoto konstrukčního návrhu bude dalším vývojem přístrojové techniky laboratoře koherenční optiky na ÚFI.



Obr. 9.3.2: Počítačem vygenerovaný náhled na navržený přístroj IVASEM.

10. ZÁVĚR

Technika ISR je velmi výhodná pro studium neuniformních optických tenkých vrstev. Zobrazení studovaného vzorku na čip CCD kamery umožňuje měřit velkou plochu vzorku a současně zachovat informaci o změnách optických vlastností vzorku podél jeho povrchu. Techniku ISR je možné užít jak v úlohách, kdy je důležité velmi vysoké laterální rozlišení pro studium velmi jemných struktur, tak v úlohách pro kontrolu unifomity vzorků připravovaných novými technologiemi, či pro studium neuniformit cíleně připravovaných.

Na Ústavu fyzikálního inženýrství je technika ISR vyvíjena již řadu let, během nichž byly sestaveny dva přístroje ISRM. První z nich byl zkonstruován se širokým spektrálním rozsahem. Tento přístroj byl následně upravován, aby byl maximalizován jeho potenciál.

Druhý přístroj vznikl na základě požadavků, které nemohl první přístroj bez velmi razantních úprav splnit. Tento druhý přístroj byl konstrukčně koncipován odlišně od prvního přístroje, což vedlo k jeho menším rozměrům a k vyššímu obrazovému rozlišení.

Technika ISR byla použita pro relativně široké spektrum úloh a výsledky měření provedených s uvedenými přístroji byly publikovány v mezinárodních vědeckých časopisech. Technika se ukazuje v některých aplikacích velmi přínosnou, má ale jistá nepřekonatelná omezení. Dalším krokem ve vývoji zobrazovacích technik pro optickou charakterizaci tenkých vrstev se jeví technika zobrazovací spektroskopické elipsometrie s proměnným úhlem dopadu světelného svazku. Významnou výhodou při realizaci této techniky je velká konstrukční podobnost se zobrazovacím spektroskopickým reflektometrem. Technika zobrazovací spektroskopické elipsometrie je obecně přesnější a poskytuje více informací o studovaném vzorku ve srovnání s technikou zobrazovací spektroskopické reflektometrie, která byla předmětem předkládané dizertační práce.

11. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

- ²CCD – vybraná část pixelů měřicí kamery sloužící jako druhý kanál
- ²RS – referenční vzorek druhého kanálu
- a – vrcholový úhel světelného kužele
- A – první rozhraní děliče
- AFM – mikroskopie atomárních sil
- AM – pomocné rovinné zrcadlo
- Ar – Argon
- As – arsen
- ASCOM – Astronomy Common Object Model
- b – změna fáze vlny při jednom průchodu tenkou vrstvou
- b – koeficient vlivu pozadí
- B – dělicí rozhraní děliče
- c – rychlost světla ve vakuu
- C – typ osazení objektivu, třetí rozhraní děliče, uhlík, kolimátor
- CS – typ osazení objektivu
- CCD – charged coupled device / měřicí kamera
- d – tloušťka vrstvy, desky
- D – signál bias + temný proud
- D – děliče a kompenzátor, průměr světelného svazku
- \vec{E} – vektor intenzity elektrického pole světelné vlny
- \vec{E}_0 – vektor amplitudy světelné vlny
- η – přístrojová funkce
- ϕ – úhel dopadu/odrazu/lomu světla
- f – ohnisková vzdálenost
- F – filtr, ohnisko
- FC – fokusační čočka
- Ga – Galium
- h – přístrojová funkce
- H – Vodík
- Hg – Rtuť
- i – imaginární jednotka
- I – Intenzita
- IM – zobrazovací zrcadlo
- IVASE – zobrazovací spektroskopická elipsometrie s proměnným úhlem dopadu
- IVASEM – zobrazovací spektroskopický elipsometr s proměnným úhlem dopadu
- ISR – Zobrazovací spektroskopická reflektometrie
- ISRER – zobrazovací spektroskopický reflektometr s vyšším laterálním rozlišením
- ISRM – zobrazovací spektroskopický reflektometr

ISRWS – zobrazovací spektroskopický reflektometr s rozšířeným spektrálním rozsahem
 k – souřadnice pixelu
 \vec{K} – vlnový vektor vlny
 Kr – Krypton
 λ – vlnová délka
 l – souřadnice pixelu
 LCD – displej s tekutými krystaly(liquid crystal display)
 LD – zaměřovací laserová dioda
 LED – light emitting diode – světlo emitující dioda
 M – monochromátor
MB – měřicí větev, pozadí
 MPZ – Mimoosové parabolické zrcadlo
MR – měřicí větev, referenční vzorek
MS – měřicí větev, studovaný vzorek
 n – index lomu
 \tilde{N} – komplexní index lomu
 N – Dusík
 nm – nanometr
 w – úhlová frekvence vlny
 p – komponenta záření polarizovaná rovnoběžně s rovinnou dopadu
 P – korigovaný signál
 PB – membránový dělič
 PC – počítač
 r – Fresnelův koeficient odrazu
 \vec{r} – polohový vektor
 R – odrazivost
RB – druhý kanál, pozadí
RR – druhý kanál, referenční vzorek
RS – druhý kanál, studovaný vzorek
 RV – referenční vzorek
 s –polarizační komponenta záření kolmá k rovině dopadu
 S – signál
 Se – selen
 Si – Křemík
 SR – spektroskopická reflektometrie
 SV– studovaný vzorek
 SMA – SubMiniature version A – typ konektoru
 t – Fresnelův koeficient průchodu
 t – čas

tp – expoziční čas kamery

u – souřadnice pixelu

ÚFI – Ústav fyzikálního inženýrství

UV – ultrafialový

v – rychlost světla v materiálu, souřadnice pixelu

VASE – spektroskopická elipsometrie s proměnným úhlem

W – Watt

x – posuv světelného svazku

Xe – Xenon

XeUV – xenonová lampa

Zn – Zinek

12. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] D. Nečas, I. Ohlídal, a D. Franta, „The reflectance of non-uniform thin films", *J. Opt. Pure Appl. Opt.*, roč. 11, č. 4, s. 45202, dub. 2009.
- [2] L. Abel-Tiberini, F. Lemarquis, a M. Lequime, „Dedicated spectrophotometer for localized transmittance and reflectance measurements", *Appl. Opt.*, roč. 45, č. 7, s. 1386, 2006.
- [3] J. Spousta *et al.*, „In situ measurements of surface homogeneity of optical parameters of weakly absorbing thin films", *Surf. Interface Anal.*, roč. 34, č. 1, s. 664–667, srp. 2002.
- [4] M. Urbánek *et al.*, „Instrument for thin film diagnostics by UV spectroscopic reflectometry", *Surf. Interface Anal.*, roč. 36, č. 8, s. 1102–1105, srp. 2004.
- [5] K. Kim, S. Kim, S. Kwon, a H. J. Pahk, „Volumetric thin film thickness measurement using spectroscopic imaging reflectometer and compensation of reflectance modeling error", *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, roč. 15, č. 9, s. 1817–1822, zář. 2014.
- [6] M. Ohlídal, V. Čudek, I. Ohlídal, a P. Klapetek, „Optical characterization of non-uniform thin films using imaging spectrophotometry", 2005, s. 596329–596329–9.
- [7] M. Urbánek, J. Spousta, T. Běhounek, a T. Šikola, „Imaging reflectometry in situ", *Appl. Opt.*, roč. 46, č. 25, s. 6309, zář. 2007.
- [8] Max Born & Emil Wolf, *Principles of Optics*. .
- [9] H. G. Tompkins a W. A. McGahan, *Spectroscopic Ellipsometry and Reflectometry: A User's Guide*. Wiley, 1999.
- [10] „Refractive index of BK7 – SCHOTT". [Online]. Dostupné z: <http://refractiveindex.info/?shelf=glass&book=BK7&page=SCHOTT>. [Viděno: 05–zář–2016].
- [11] E. D. Palik, *Handbook of optical constants of solids*. Orlando: Academic Press, 1985.
- [12] D. Franta, D. Nečas, a I. Ohlídal, „Universal dispersion model for characterization of optical thin films over a wide spectral range: application to hafnia", *Appl. Opt.*, roč. 54, č. 31, s. 9108–9119, lis. 2015.
- [13] D. Franta, D. Nečas, a L. Zajíčková, „Models of dielectric response in disordered solids", *Opt. Express*, roč. 15, č. 24, s. 16230, 2007.
- [14] I. Ohlídal, M. Ohlídal, D. Nečas, D. Franta, a V. Buršíková, „Optical characterisation of SiOxCyHz thin films non-uniform in thickness using spectroscopic ellipsometry, spectroscopic reflectometry and spectroscopic imaging reflectometry", *Thin Solid Films*, roč. 519, č. 9, s. 2874–2876, úno. 2011.
- [15] D. Nečas, I. Ohlídal, D. Franta, M. Ohlídal, V. Čudek, a J. Vodák, „Measurement of thickness distribution, optical constants, and roughness parameters of rough nonuniform ZnSe thin films", *Appl. Opt.*, roč. 53, č. 25, s. 5606, zář. 2014.
- [16] M. Ohlídal, I. Ohlídal, P. Klapetek, D. Nečas, a A. Majumdar, „Measurement of the thickness distribution and optical constants of non-uniform thin films", *Meas. Sci. Technol.*, roč. 22, č. 8, s. 85104, srp. 2011.
- [17] M. Ohlídal, I. Ohlídal, P. Klapetek, D. Nečas, a others, „Precise measurement of thickness distribution of nonuniform thin films by imaging spectroscopic reflectometry", in *XIX IMEKO World Congress: Fundamental and Applied Metrology, Proceedings*, 2009, s. 100–105.
- [18] D. Nečas, I. Ohlídal, J. Vodák, M. Ohlídal, a D. Franta, „Simultaneous determination of optical constants, local thickness, and local roughness of thin films by imaging spectroscopic reflectometry", 2015, roč. 9628, s. 96280C–96280C–9.
- [19] D. Nečas *et al.*, „Assessment of non-uniform thin films using spectroscopic ellipsometry and imaging spectroscopic reflectometry", *Thin Solid Films*, roč. 571, Part 3, s. 573–578, lis. 2014.

- [20] D. Nečas *et al.*, „Measurement of optical parameters of thin films non-uniform in thickness“, in *2014 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2014)*, 2014, s. 600–601.
- [21] J.-S. Kwon, Y. H. Kim, E. H. Choi, a K.-N. Kim, „Development of ultra-hydrophilic and non-cytotoxic dental vinyl polysiloxane impression materials using a non-thermal atmospheric-pressure plasma jet“, *J. Phys. Appl. Phys.*, roč. 46, č. 19, s. 195201, kvě. 2013.
- [22] K. Rügner, R. Reuter, D. Ellerweg, T. de los Arcos, A. von Keudell, a J. Benedikt, „Insight into the Reaction Scheme of SiO₂ Film Deposition at Atmospheric Pressure“, *Plasma Process. Polym.*, roč. 10, č. 12, s. 1061–1073, pro. 2013.
- [23] J. Schäfer, R. Foest, A. Quade, A. Ohl, a K.-D. Weltmann, „Local deposition of SiO_x plasma polymer films by a miniaturized atmospheric pressure plasma jet (APPJ)“, *J. Phys. Appl. Phys.*, roč. 41, č. 19, s. 194010, říj. 2008.
- [24] J. Benedikt, V. Raballand, A. Yanguas-Gil, K. Focke, a A. von Keudell, „Thin film deposition by means of atmospheric pressure microplasma jet“, *Plasma Phys. Control. Fusion*, roč. 49, č. 12B, s. B419, pro. 2007.
- [25] D. Nečas *et al.*, „Mapping of properties of thin plasma jet films using imaging spectroscopic reflectometry“, *Meas. Sci. Technol.*, roč. 25, č. 11, s. 115201, lis. 2014.
- [26] V. Čudek, „Návrh a realizace zařízení pro studium optické nehomogenity tenkých vrstev“, Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav fyzikálního inženýrství, Brno, 2005.
- [27] J. Vodák, „Návrh zrcadlového kolimátoru pro světelný svazek vystupující z kabelu křemenných vláken kruhového průřezu“, Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav fyzikálního inženýrství, Brno, 2010.
- [28] J. Vodák, „Optimalizace zobrazovacího spektrofotometru“, Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav fyzikálního inženýrství, Brno, 2012.
- [29] J. F. Verrill, „The Specification and Measurement of Scattered Light from Diffraction Gratings“, *Opt. Acta Int. J. Opt.*, roč. 25, č. 7, s. 531–547, čvc. 1978.
- [30] T. N. Woods, R. T. Wrigley III, G. J. Rottman, a R. E. Haring, „Scattered-light properties of diffraction gratings“, *Appl. Opt.*, roč. 33, č. 19, s. 4273, čvc. 1994.
- [31] D. Nečas, J. Vodák, I. Ohlídal, M. Ohlídal, A. Majumdar, a L. Zajíčková, „Simultaneous determination of dispersion model parameters and local thickness of thin films by imaging spectrophotometry“, *Appl. Surf. Sci.*, roč. 350, s. 149–155, zář. 2015.
- [32] J. Vodák *et al.*, „Application of imaging spectroscopic reflectometry for characterization of gold reduction from organometallic compound by means of plasma jet technology“, *Appl. Surf. Sci.*
- [33] D. Beaglehole, „Performance of a microscopic imaging ellipsometer“, *Rev. Sci. Instrum.*, roč. 59, č. 12, s. 2557–2559, 1989.
- [34] U. Wurstbauer *et al.*, „Imaging ellipsometry of graphene“, *Appl. Phys. Lett.*, roč. 97, č. 23, s. 231901, pro. 2010.
- [35] L. Asinovski, D. Beaglehole, a M. T. Clarkson, „Imaging ellipsometry: quantitative analysis“, *Phys. Status Solidi A*, roč. 205, č. 4, s. 764–771, dub. 2008.
- [36] M. Fried *et al.*, „Expanded beam (macro-imaging) ellipsometry“, *Thin Solid Films*, roč. 519, č. 9, s. 2730–2736, úno. 2011.
- [37] LOT–QuantumDesign Europe, „Basics – Lamp spectra and irradiance“. 24–srp–2015.
- [38] „Fused Silica“, *United Lens*. [Online]. Dostupné z: <https://www.unitedlens.com/materials-fused-silica>. [Viděno: 04–lis–2016].

- [39] S. D. Hamamatsu Photonics K.K., „Hamamatsu data sheet BT(Back-thinned)–CCD Cooled Digital Camera ORCA II–BT–512G". .
- [40] I. Thorlabs, „Unmounted Bandpass Colored Glass Filters". [Online]. Dostupné z: https://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3695&pn=FGUV11. [Viděno: 24–srp–2015].
- [41] I. Thorlabs, „Pellicle Beamsplitters". [Online]. Dostupné z: https://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=898&pn=BP245B1. [Viděno: 24–srp–2015].
- [42] Sony, Corp., „ICX285AL: Diagonal 11 mm (Type 2/3) Progressive Scan CCD Image Sensor with Square Pixel for B/W Cameras". .
- [43] J. Vodák a M. Ohlídal, „Zobrazovací spektroskopický reflektometr založený na membránovém děliči.", *Jemná Mech. Opt. Věda – Výzk. – Technol. – Realiz. Tech. Obor. Časopis*, roč. 61, č. 6, s. 144–148, 2016.